

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LAÍS THIE HASUDA NAKAO

VIABILIDADE DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER PARA  
LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS: SISTEMATIZAÇÃO DE UM MÉTODO DE  
ANÁLISE, FILTRAGEM E PROCESSAMENTO

CURITIBA

2020

LAÍS THIE HASUDA NAKAO

VIABILIDADE DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER PARA  
LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS: SISTEMATIZAÇÃO DE UM MÉTODO DE  
ANÁLISE, FILTRAGEM E PROCESSAMENTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Pereira Krueger

Coorientador: Prof Dr Tobias Bernward Bleninger

CURITIBA

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

N163v

Nakao, Laís Thie Hasuda

Viabilidade de um perfilador acústico de efeito *doppler* para levantamentos batimétricos: sistematização de um método de análise, filtragem e processamento [recurso eletrônico]/ Laís Thie Hasuda Nakao - Curitiba, 2020.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Profa Dra Cláudia Pereira Krueger

Coorientador: Prof Dr Tobias Bernward Bleninger

1. Levantamentos hidrográficos. 2. Reservatório. I. Krueger, Cláudia Pereira. II. Bleninger, Tobias Bernward. III. Título. IV.

CDD 526.99

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LAÍS THIE HASUDA NAKAO** intitulada: **VIABILIDADE DE UM PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER PARA LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS: SISTEMATIZAÇÃO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE, FILTRAGEM E PROCESSAMENTO**, sob orientação da Profa. Dra. CLAUDIA PEREIRA KRUEGER, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 05 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

03/12/2020 16:04:39.0

CLAUDIA PEREIRA KRUEGER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/12/2020 12:06:39.0

ARTHUR AYRES NETO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE)

Assinatura Eletrônica

03/12/2020 14:09:52.0

JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/02/2021 18:43:07.0

LUIZ ANTONIO PEREIRA DE SOUZA

Avaliador Externo (INSTITUTO DE PESQ. TECNOLÓGICAS DO  
ESTADO DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

03/12/2020 15:08:43.0

JOSÉ EDUARDO GONÇALVES

Avaliador Interno (INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMEPAR)

Assinatura Eletrônica

03/12/2020 16:51:46.0

WILSON ALCÂNTARA SOARES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



*Ao meu querido amigo, Roberto Alves Lima Jr., que me ensinou a nunca desistir.*  
*(In memoriam)*

# AGRADECIMENTOS

À minha família pelo amor incondicional, apoio e incentivo durante toda a minha vida.

Meu eterno obrigado ao meu companheiro da vida, Erick, que me incentivou e apoiou desde meu mestrado mesmo sabendo da minha ausência em alguns momentos.

À minha orientadora, Claudia Pereira Krueger, por me acolher desde o primeiro contato na Especialização em 2013. Serei eternamente grata por todo apoio, aprendizado e amizade durante esses anos.

Ao meu co-orientador, Tobias Bleninger, pelo otimismo, discussões e ensinamentos.

Aos amigos e colegas do PPGERHA pela agradável convivência durante os períodos de disciplina e discussões.

Aos membros do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia, pela parceria diária e intensas discussões.

Aos professores e funcionários do PPGERHA pela dedicação com suas respectivas funções, garantindo o aprendizado e nos poupando de trabalhos burocráticos.

À Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) por autorizar os estudos no reservatório Passaúna e disponibilizarem uma embarcação para que pudéssemos executar os levantamentos. Em especial à Ana e Eric, pelo apoio logístico durante os campos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante todo o período do doutorado, sem a qual não teria sido possível realizar essa pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos que possibilitaram a compra de equipamentos e as coletas de dados.

Aos Professores e alunos da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), pelo apoio logístico e de campo realizado no Rio Taquari/MS.

Ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI), que através de um termo de cooperação com o DNIT, disponibilizou auxílio financeiro para as campanhas no rio Taquari/MS.

Ao Projeto MuDak (*Multidisciplinary data acquisition as the key for a globally applicable water resource management*) pelo recurso disponibilizado para participação dos eventos de coleta e colaboração nos conduzidos no reservatório Passaúna.

*"Restará sempre muito o que fazer..."*  
*(Antonio Reginaldo Pontes Lima)*

## RESUMO

A dinâmica dos ambientes aquáticos demanda uma frequência, ajustada ao ambiente em estudo, de levantamentos batimétricos para um monitoramento acurado. Porém, o alto custo relacionados aos fatores econômicos é um desafio para a execução da coleta de dados batimétricos usando os métodos convencionais, e consequentemente o monitoramento contínuo. O desenvolvimento do ADCP, possibilitou a coleta de profundidades simultaneamente às velocidades das correntes (finalidade para a qual foi concebida). Este método proporciona uma redução de custo para coleta de dados batimétricos. Esta pesquisa propôs uma sistematização do pós-processamento dos dados de um Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (ADCP) usando seus feixes Doppler para obter informações adicionais de profundidade com o objetivo de obter um resultado batimétrico de alta qualidade. Para validar o conjunto de dados de profundidade numa zona de controle, foram utilizadas uma haste graduada, a técnica de posicionamento RTK e um ecobatímetro monofeixe (SBES). O pós-processamento desenvolvido na área de controle foi aplicado em uma pequena área de um reservatório de abastecimento de água em Araucária, região metropolitana da cidade de Curitiba, no estado do Paraná, Brasil. Um método robusto de regressão local eliminou os dados espúrios, suavizando o conjunto de dados com os quais foi gerado um modelo de regressão linear para os feixes do ADCP com o intuito de ajustar as profundidades e melhorar o conjunto de dados. O teste de hipótese de Wilcoxon realizado antes e depois do ajustamento validou o processamento dos dados. Os volumes resultantes calculados a partir dos dados brutos do ADCP mostraram uma discrepância de 30% com o SBES, equipamento convencional utilizado para realizar levantamentos batimétricos. As técnicas de pós-processamento propostas reduziram para menos de 1% na diferença do volume. O desvio-padrão do conjunto de dados brutos foi em média de 0,15 m para os feixes Doppler e após ajustes, este valor reduziu para 0,03 m. Quando comparados com as especificações técnicas da Agência Nacional de Águas e *Internacional Hydrographic Organization* os dados ajustados apresentaram melhora de aproximadamente 83% em relação aos dados brutos. Os dados brutos indicam a necessidade de um método de pós-processamento para o enquadramento, de acordo com as especificações técnicas, da acurácia dos dados de profundidade do ADCP. O procedimento é fortemente recomendável, uma vez que os resultados mostraram uma melhoria nos dados de profundidade ADCP.

**Palavras-chaves:** Levantamento batimétrico. Pós-processamento. Reservatório. Volume.

# ABSTRACT

The dynamics of aquatic environments demand a frequency, appropriate to the region under study, of bathymetric surveys for accurate monitoring. However, the high-cost regard of economic issues is a challenge to gather bathymetric data using conventional methods, and consequently the continuous monitoring of the study area. The development of ADCP allowed the acquisition of depths simultaneously to the current speed (purpose for which it was designed). This method provides a cost reduction for bathymetric data collection. A post-processing systematization of the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) was proposed in this research. The aim was to use the Doppler beams to obtain additional depth information and a high-quality bathymetric result. The depth dataset validation was achieved by using a scaled rod, RTK positioning technique, and a Single Beam Echo Sounder (SBES) in a control area. The post-processing was developed in the control area and applied to a small region of a supply water reservoir in Araucária, in the metropolitan Curitiba area, in Brazil. A robust local regression method eliminated outliers, and a linear regression model with the smoothed data for the ADCP beams was generated to adjust depths and improve the dataset. The Wilcoxon statistical hypothesis test was performed before and after the adjustment validated data processing. The resulting volumes calculated from the raw data of ADCP showed a discrepancy of 30% with SBES, which is usually the standard equipment used for bathymetric surveys. The proposed post-processing techniques declined to less than 1% of the volume difference. The raw dataset standard deviation was 0.15 m on average for Doppler beams, and after adjusts, this value dropped to 0.03 m. The comparison with the National Water Agency and International Hydrographic Organization technical specifications the adjusted data presented an improvement of 83% related to the raw data. The raw data indicates the need for a post-processing method to fit, according to the technical specification, the accuracy of depth ADCP data. The procedure is highly advised since the results showed an improvement in the ADCP depth data.

**Key-words:** Bathymetric survey. Post-processing. Reservoir. Volume.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Movimentos do navio que devem ser corrigidos por sensores. . . . .	29
Figura 2 – Levantamento batimétrico utilizando um sensor monofeixe que faz a varredura em uma faixa estreita do leito. . . . .	32
Figura 3 – <i>Doppler Shift</i> causado pela reflexão do som. . . . .	33
Figura 4 – Precisão dependente da linha de base para os diferentes métodos de posicionamento. . . . .	35
Figura 5 – Método de Posicionamento Absoluto. . . . .	36
Figura 6 – Conjunto M9 (ADCP M9 + GPS Hemisphere) e ecobatímetro monofeixe SDH-13A conectado ao receptor GPS Leica instalados na embarcação. . . . .	46
Figura 7 – RiverSurveyor M9 composto por uma sonda, PCM, GPS, e prancha. . . . .	47
Figura 8 – Ecobatímetro monofeixe modelo SDH-13A, fabricante Odom Hydrographic Systems. . . . .	49
Figura 9 – A esquerda: antena AX1202 GG e receptor GX1230 GG. À direita: rádio modelo PDL HPB do fabricante Pacif Crest usado na transmissão das correções diferenciais da estação base para o <i>rover</i> . . . . .	50
Figura 10 – Ecobatímetro monofeixe modelo SDE-28S do fabricante South Surveying & Mapping Instrument CO.,LTD. e receptor GPS WS3910 fabricado pela empresa Wi-Sys Communications Inc. <sup>1</sup> . . . . .	51
Figura 11 – Organograma das análises realizadas para o posicionamento planimétrico, utilizando o receptor Hemisphere A21, e seus respectivos objetivos. . . . .	52
Figura 12 – Croqui da localização dos pontos RM01, RM03, P01 e P02 usados para o teste estático de precisão e acurácia com GPS. . . . .	53
Figura 13 – (A) Estação de referência para RTK (SonTek), a qual irá calcular as correções diferenciais e enviar para <i>rover</i> via rádio, instalado na RM01 (B) <i>rover</i> instalado na RM03. . . . .	54
Figura 14 – Organograma da configuração dos equipamentos na coleta de dados e análises realizadas para o posicionamento planimétrico. Onde, RM01, RM03, P01 e P02 são pontos de coordenadas conhecidas $(\phi, \lambda, h)$ ; Dif $H_i$ é a diferença entre a coordenada medida, utilizando apenas um receptor( $H_i$ ) ou dois ( $LH_i$ ) para o teste de interferências, e a coordenada precisa (RM03). Em caso da diferença do posicionamento planimétrico ser menor que 2 metros, aceita-se o receptor Hemisphere para levantamentos batimétricos. . . . .	55
Figura 15 – Vértices de controle e marco RM03, utilizados nos testes cinemáticos. . . . .	56



Figura 16	–Organograma da configuração dos equipamentos na coleta de dados e análises realizadas para o posicionamento planimétrico. Onde, RM03 e P02 são pontos de coordenadas conhecidas $(\phi, \lambda, h)$ usados para alocação das estações base; Dif $H_i$ é a diferença entre a coordenada medida, utilizando apenas um receptor( $H_i$ ) ou dois ( $LH_i$ ) para o teste de interferências, e as coordenadas precisas dos vértices de controle. As obstruções foram divididas em três níveis: baixa obstrução (NB), média obstrução (NM) e alta obstrução (NA). Em caso da diferença do posicionamento planimétrico ser menor que 2 metros, o receptor Hemisphere A21 é aceito para levantamentos batimétricos. . . . .	57
Figura 17	–Organograma dos testes para avaliação dos produtos batimétricos obtidos pelo ADCP e seus respectivos objetivos. . . . .	60
Figura 18	–À esquerda: foto da piscina onde foram realizados os testes. À direita: croqui da piscina onde foram efetuadas as medições de profundidade. . .	61
Figura 19	–Estação de referência instalada no ponto CP01 para os testes em ambiente controlado. . . . .	61
Figura 20	– <i>Offsets</i> usados na configuração do ADCP M9 e ecobatímetro monofeixe SDH-13A para os testes. . . . .	62
Figura 21	–Organograma dos testes realizados em ambiente controlado. $VB$ é o feixe vertical do ADCP; $DB$ são os feixes Doppler do ADCP; $ROD_i$ é a medida manual com a haste graduada; $RVB_i$ e $RDB_i$ são as diferenças entre o ADCP ( $VB$ e $DB$ ) e ROD; $SB1VB_i$ $SB1DB_i$ , $SB2VB_i$ e $SB2DB_i$ são as diferenças entre o ADCP ( $VB$ e $DB$ ) e ROD com a presença dos ecobatímetros monofeixes South SDE-28S ( $SB1$ ) e Odom SDH-13A ( $SB2$ ); onde $i$ é o número de medições. . . . .	63
Figura 22	–Trajetórias realizadas nos testes cinemáticos. . . . .	64
Figura 23	–Organograma do teste cinemático realizado em ambiente controlado. Onde $VB$ é o feixe vertical e $DB$ é o feixe Doppler do ADCP, $RVB$ e $RDB$ são os resíduos do MDE do ADCP em relação às medições realizadas SBES. $VB_{mi,i}$ e $DB_{mi,i}$ são as profundidades filtradas usando o as medições manuais (ROD) e o ecobatímetro monofeixe (SBES). . .	65
Figura 24	–Localização do reservatório Passaúna, indicando a região do buffer dentro da área circulada. . . . .	68
Figura 25	–Linhas de sondagem navegadas durante a aquisição de dados, processo que foi administrado pelo <i>software HydroSurveyor</i> . . . . .	69
Figura 26	–Resumo da sequência do levantamento e processamento na região do <i>buffer</i> no reservatório Passaúna. . . . .	70
Figura 27	–Localização do rio Taquari, cidade de Coxim, MS. . . . .	71

Figura 28	–Localização da estação de referência e linhas de pesquisa executadas com o ADCP operado pelo <i>software HydroSurveyor</i> . . . . .	72
Figura 29	–Discrepâncias em metros das coordenadas em latitude (D Lat), longitude (D Lon) e altitude (D Alt) do levantamento com GPS Hemisphere em relação às coordenadas precisas do marco RM01. Cada cor representa um teste realizado, onde H são os teste com a antena Hemisphere operando isoladamente e LH são os testes operando simultaneamente a outra antena. . . . .	74
Figura 30	–Gráfico dos valores de HDOP e número de satélites durante os levantamentos estáticos com GPS Hemisphere. Cada cor representa um teste realizado, onde H são os teste com a antena Hemisphere operando isoladamente e LH são os testes operando simultaneamente a outra antena. . . . .	74
Figura 31	–Pontos de coordenadas precisas utilizadas como vértices de controle. . .	76
Figura 32	–Trajetórias realizadas com GPS Hemisphere com diferentes alturas de antena. . . . .	77
Figura 33	–Parâmetros da qualidade do posicionamento (DOP, número de satélites, elevação e visibilidade dos satélites) da constelação NAVSTAR-GPS no momento dos levantamentos. . . . .	78
Figura 34	–Skyplot dos satélites da constelação GPS durante o levantamento com GPS Hemisphere. Sistema de Referência SIRGAS2000 / UTM zona 22S.	79
Figura 35	–Trajetórias realizadas com GPS Hemisphere simultaneamente com Leica com diferentes alturas de antena. . . . .	80
Figura 36	–Gráficos das profundidades coletadas com SBES <i>South</i> à esquerda; e à direita com SBES <i>Odom</i> . Em ambos os gráficos as linhas tracejadas em vermelho representam as profundidades limite da área de controle, obtidas com a haste graduada. . . . .	84
Figura 37	–Gráficos dos dados brutos das profundidades coletadas, com feixes vertical (VB) e doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP, ao longo do tempo, para os testes estáticos. Onde as linhas pretas tracejadas representam os limites da área de controle obtidos com bastão graduado (ROD). . . . .	85
Figura 38	–Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET1. Onde o intervalo entre as linhas verticais vermelhas representam o limite da área de controle obtida com bastão graduado. À direita estão plotadas as profundidades. . . . .	86

Figura 39	–Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET2. Onde a linha vertical vermelha representa os limites da área de controle obtida com bastão graduado. À direita estão plotadas as profundidades. . . .	87
Figura 40	–Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET3. Onde a linha vertical vermelha representa os limites da área de controle obtida com bastão graduado. À direita as profundidades pelo seu número amostral foram plotadas. . . . .	88
Figura 41	–Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET4. Onde a linha vertical vermelha representa os limites da área de controle obtida com bastão graduado. À direita as profundidades pelo seu número amostral foram plotadas. . . . .	88
Figura 42	–Histogramas e gráfico das profundidades do feixe vertical para cada cenário (ET1, ET2, ET3 e ET4). . . . .	89
Figura 43	–À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1,DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT1.	92
Figura 44	–À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1,DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT2.	93
Figura 45	–À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1,DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT3.	93
Figura 46	–À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1,DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT4.	94
Figura 47	–Esquerda: Gráfico de profundidade do SBES e medições manuais (ROD). Direita: Histograma dos resíduos do SBES em relação ao ROD. . . .	95

Figura 48	– Gráficos de profundidade do SBES e tolerâncias de medições manuais (ROD TUV) de acordo com as especificações técnicas da IHO. . . . .	96
Figura 49	– Conjunto das profundidades brutas dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP representadas pelos pontos, e as profundidades mínima e máxima medidas com a haste graduada (ROD) representadas pelas linhas pretas tracejadas. . . . .	97
Figura 50	– Conjunto das profundidades suavizadas do ADCP (VB, DB1, DB2, DB3 e DB4) representada pelos pontos e as profundidades mínima e máxima medidas com a haste graduada (ROD) representada pelas linhas pretas tracejadas. . . . .	98
Figura 51	– Gráficos superiores: Profundidades manuais (ROD) representado pelos pontos em cinza e feixe vertical (VB) em azul. Gráficos inferiores: Profundidades manuais (ROD) representado pelos pontos em cinza e feixes inclinados (DB) em azul. . . . .	99
Figura 52	– Gráfico e histogramas das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP representadas pelas cores azul, laranja e amarelo, respectivamente; e as linhas tracejadas pretas representando as profundidades com a haste graduada (ROD). . . . .	100
Figura 53	– Modelos de regressão linear gerados a partir das profundidades coletadas com a haste graduada (ROD) e ADCP, feixes vertical (VB: gráficos superiores) e Doppler (DB: gráficos inferiores); onde $R^2$ é o coeficiente de determinação do modelo. . . . .	101
Figura 54	– Gráfico das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas dos feixes vertical (VB: gráficos superiores) e Doppler (DB: gráficos inferiores) do ADCP representadas pelas cores azul, laranja e amarelo, respectivamente; e as linhas tracejadas pretas representando as incertezas verticais totais (ROD TVU) para cada testes e cada feixe. . . . .	101
Figura 55	– Gráfico de profundidades do ADCP, representadas pelas linhas tracejadas azul (VB) e laranja (DB), e a linha preta os dados do SBES. Os histogramas em relação aos resíduos das profundidades do ADCP em relação ao SBES. . . . .	103
Figura 56	– Modelos de regressão linear gerados a partir das profundidades coletadas com o ecobatímetro monofeixe (SBES) e ADCP, feixes vertical (VB: gráficos superiores) e Doppler (DB: gráficos inferiores); onde $R^2$ é o coeficiente de determinação do modelo. . . . .	104
Figura 57	– Profundidades, bruta, suavizada e ajustada, do conjunto total de medições com os feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP. . . . .	105

Figura 58	–Gráfico de profundidade, dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP, bruto, suavizado e ajustado; e tolerâncias de medições usando SBES de acordo com o cálculo da Ordem Especial seguindo as normas técnicas da IHO (TVU) e Agência Nacional de Águas (ANA). . . . .	105
Figura 59	–Distribuição espacial dos resíduos dos dados bruto, suavizado e ajustado, do feixe vertical do ADCP em relação às medições com SBES para cada cenário (CT1, CT2, CT3 e CT4). . . . .	107
Figura 60	–Distribuição espacial dos resíduos dos dados bruto, suavizado e ajustado, dos feixes Doppler do ADCP em relação às medições com SBES para cada cenário (CT1, CT2, CT3 e CT4). . . . .	108
Figura 61	–Profundidades brutas (gráfico superior) e suavizadas (gráfico inferior), dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP.	109
Figura 62	–Histograma das profundidades brutas, dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP coletadas na região do <i>buffer</i> no reservatório Passaúna. . . . .	110
Figura 63	–Gráfico: Profundidades coletadas no reservatório Passaúna com SBES (linha tracejada preta) e feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP. Histogramas à esquerda: frequência dos resíduos das profundidades coletadas com o feixe vertical (VB) do ADCP em relação às medições com SBES. . . . .	111
Figura 64	–Histograma das profundidades do SBES e dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP (profundidades bruta, suavizada e ajustada pelo modelo obtido na área de controle). . . . .	111
Figura 65	–Distribuição espacial dos resíduos entre MDE das profundidades dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) ajustadas pelo modelo obtido na área de controle e os dados coletados com SBES. . . . .	112
Figura 66	–Histograma dos resíduos dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP (dados bruto, suavizado e ajustado em relação ao SBES). . . . .	112
Figura 67	–Distribuição espacial e histograma dos parâmetros de qualidade do posicionamento planimétrico disponibilizado pelo GPS Hemisphere. Onde a qualidade do posicionamento se refere ao método utilizado no momento do levantamento, sendo 0 nenhum, 2 DGPS, e 5 RTK. . . . .	113
Figura 68	–Gráficos dos feixes vertical (gráfico superior) e Doppler (gráfico inferior) das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas pelo modelo obtido na área de controle, em relação aos erros permitidos pela ANA representada pelas linhas magentas e IHO representada pelas linhas pretas. . . . .	114
Figura 69	–Modelos de regressão linear para os feixes vertical (VB) e Doppler (DB) em relação às medições com SBES. . . . .	115

Figura 70	–Histograma das profundidades do SBES e dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP. . . . .	115
Figura 71	–Histograma dos resíduos das profundidades dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) em relação às medições com SBES. . . . .	116
Figura 72	–Gráficos dos feixes vertical (gráfico superior) e Doppler (gráfico inferior) das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas em relação aos erros permitidos pela ANA representada pelas linhas magentas e IHO representada pelas linhas pretas. . . . .	116
Figura 73	–Histograma separado por feixe, vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP do ADCP confrontando os dados do SBES, onde as linhas verticais representam as profundidades mínima e máxima aceitas de acordo com as normas da ANA (linhas em magenta) e IHO (TVU - linhas em preto). . . . .	117
Figura 74	–Modelo Digital de Elevação dos dados, suavizados e ajustados, do SBES e ADCP. . . . .	118
Figura 75	–Profundidades brutas para os dois dias de levantamento. . . . .	121
Figura 76	–Profundidades suavizadas para os dois dias de levantamento. . . . .	121
Figura 77	–Histograma dos dados brutos e suavizados para cada feixe referente ao levantamento realizado no primeiro dia de campanha. . . . .	122
Figura 78	–Histograma dos dados brutos e suavizados para cada feixe referente ao levantamento realizado no segundo dia de campanha. . . . .	122
Figura 79	–MDE gerados a partir de dados coletados com o conjunto M9 da SonTek no rio Taquari-MS. . . . .	123
Figura 80	–MDE bruto suavizado e ajustado (VB e DB) pelos modelos de regressão linear criada com dados do reservatório Passaúna. . . . .	124
Figura 81	–Distribuição espacial dos parâmetros de qualidade do posicionamento usando o GPS Hemisphere para os dois dias de campanhas. Onde valor igual a 2 significa a utilização do método DGPS e 4 representa o uso do método RTK. . . . .	125
Figura 82	–Histogramas dos resíduos entre os dois MDE's do rio Taquari, onde os valores negativos representam a erosão (barras em vermelho) e os valores positivos a deposição de sedimento (barras em verde). . . . .	125
Figura 83	–MDE's das altitudes elipsoidais para os dois dias de levantamento e a diferença entre os modelos. . . . .	126
Figura 84	–Perfis longitudinais retirados para análise das estruturas de fundo. . . . .	127
Figura 85	–Gráfico longitudinal dos perfis amostrais para os dias 01/02/18 e 02/02/18 em azul e vermelho, respectivamente. Onde o eixo x é a distância do perfil longitudinal e em Y as profundidades. . . . .	128



Figura 86 – Modelos de profundidades com perfis longitudinais selecionados para análise de estruturas de fundo e modelos das velocidades médias para dois dias de campanha no rio Taquari. . . . .	129
Figura 87 – Perfil de velocidades em uma seção longitudinal no rio Taquari. . . . .	129

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resumo dos autores que utilizaram o ADCP, seja com o feixe vertical (VB) e/ou feixes inclinados por efeito Doppler (DB), para medição de profundidade. Em alguns casos a acurácia da profundidade foi analisada e validada a partir de outro método, porém nenhum deles apresentou um método geral de processamento dos dados. . . . .	26
Tabela 2	– Resumo dos trabalhos desenvolvidos com o ADCP para determinação da profundidade . . . . .	45
Tabela 3	– Especificações técnicas do Riversurveyor M9. . . . .	48
Tabela 4	– Acurácias dos métodos de posicionamento fornecidas pelo fabricante Leica Geosystems. . . . .	50
Tabela 5	– Coordenadas geodésicas dos pontos RM01, RM03, P01 e P02, no sistema de referência SIRGAS 2000, e seus respectivos desvios padrão, obtidos pelo método de posicionamento relativo estático. . . . .	53
Tabela 6	– Valores das discrepâncias entre as coordenadas obtidas pelo método RTK e as coordenadas precisas do ponto, número de satélites observados e valores de HDOP. . . . .	75
Tabela 7	– Valores do erro médio quadrático em latitude ( $RMSE_E$ ), longitude ( $RMSE_N$ ) e altitude ( $RMSE_{up}$ ) . . . . .	75
Tabela 8	– Discrepâncias das latitudes em relação aos vértices de referência. . . .	81
Tabela 9	– Discrepância da longitude em relação aos vértices de referência. . . .	81
Tabela 10	– Discrepância da altitude em relação aos vértices de referência. . . . .	81
Tabela 11	– Raiz do erro médio quadrático planimétrico, em metros, dos vértices considerando as quatro trajetórias. . . . .	82
Tabela 12	– Profundidades pontuais coletadas na área controle com uma haste graduada e suas respectivas coordenadas obtidas a partir do método RTK. Sistema de referência WGS-84 / UTM zona 22S. . . . .	83
Tabela 13	– Profundidades de referência obtidas com a haste graduada e posicionador RTK (ROD) para cada cenário (ET1, ET2, ET3 e ET4) de acordo com a configuração indicada em cada ilustração na sequência. . . . .	84
Tabela 14	– Valores de profundidades mínima, máxima, média desvio padrão (desv pad), diferenças mínima (dif min) e máxima (dif max) da medição dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP em relação às medições manuais (ROD) em metros; e o erro médio quadrático (RMSE), para cada cenário (ET1, ET2, ET3 e ET4). . . . .	90

Tabela 15	–Valores mínimo, máximo, média e desvio padrão, em metros, da profundidade em módulo para cada feixe do ADCP, vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), para cada cenário (CT1, CT2, CT3 e CT4) obtidos na área de controle. . . . .	94
Tabela 16	–Volume calculado para cada feixe do ADCP, feixe vertical e Doppler, e suas discrepâncias em relação ao volume de referência obtido com o SBES. . . . .	119
Tabela 17	–Resumo comparativo dos valores de profundidade mínimo, máximo, desvio padrão e erro médio quadrático, em metros, dos feixes vertical e Doppler do ADCP e SBES. O volume dos dados do ADCP ajustados com os modelos de regressão linear obtidos na área de controle (MRL AC) confrontando os modelos usando os dados coletados <i>in situ</i> (MRL P). . . . .	119
Tabela 18	–Altura, comprimento e variação das estruturas de fundo, em metros, para dois dias de campanha realizadas no rio Taquari. . . . .	128

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AUSPOS	<i>Australian Surveying and Land Information Group's Online GPS Processing Service</i>
BT	<i>Bottom Track</i>
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CSRS-PPP	<i>Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning Service</i>
CTD	<i>Conductivity, Temperature and Depth</i>
DB	Feixes por efeito Doppler do ADCP
DDF	Dupla Diferença de Fase
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
E	Coordenada topocêntrica local na direção Este
GALILEO	<i>European Satellite Navigation System</i>
GBAs	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GGA	<i>Global Positioning System Fix Data (NMEA 0183)</i>
GLONASS	<i>GLObal NAVigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Sattelite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HDOP	<i>Diluição da precisão horizontal</i>
HS	<i>Hydro Surveyor</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>

IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IHO	<i>International Hydrographic Organization</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LAGEH	Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia
LGO	<i>Leica Geo Office Combined</i>
MA	Método Absoluto
MBES	<i>Multi-Beam Echo Sounder</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MLWS	<i>Mean Low Water Springs</i>
MPRC	Método de Posicionamento Relativo Cinemático
MPRE	Método de Posicionamento Relativo Estático
N	Coordenada topocêntrica local na direção Norte
NAVSTAR-GPS	<i>NAVigation System with Time And Ranging - GPS</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NMM	Nível Médio do Mar
NR	Nível de Redução
NRCan	<i>Natural Resources of Canada</i>
NSDI	<i>National Spatial Data Infrastructure</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
PCM	<i>Power &amp; Communication Module</i>
PD	Pseudodistância
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
PP	Posicionamento por Ponto
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
RBMC GNSS	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

RBMC-IP GNSS	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real - Protocolo Internet
RN	Referência de Nível
RMSE	Erro médio quadrático
RSL	<i>River Surveyor Live</i>
RTCM	<i>Radio Technical Committee for Maritime Service</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SBA	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SBES	<i>Single Beam Echo Sounder</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
THU	<i>Total Horizontal Uncertainty</i>
TVU	<i>Total Vertical Uncertainty</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
up	Coordenada topocêntrica local na direção vertical
VB	Feixe vertical do ADCP
VDOP	<i>Vertical Dilution of Precision</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VTG	<i>Vector track an Speed over the Ground</i> (NMEA 0183)
WGS-84	<i>World Geodetic System, 1984</i>



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>27</b>
2.1	LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	27
2.1.1	Medidores Acústicos	31
2.1.1.1	Ecobatímetro Monofeixe	31
2.1.1.2	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> (ADCP)	32
2.2	SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITES (GNSS)	34
2.2.1	Métodos de Posicionamento	34
2.2.1.1	Método Absoluto	35
2.2.1.2	Posicionamento por Ponto Preciso	36
2.2.1.3	Método de Posicionamento Relativo Estático	37
2.2.1.4	Método de Posicionamento Relativo Cinemático	37
2.2.1.5	DGPS	38
2.2.1.6	RTK - <i>Real Time Kinematic</i>	38
2.3	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	39
2.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	39
<b>3</b>	<b>ESTUDOS SIMILARES NO CONTEXTO DE LEVANTAMENTOS BATI- MÉTRICOS UTILIZANDO ADCP</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>EQUIPAMENTOS</b>	<b>46</b>
4.1	RIVERSURVEYOR M9	47
4.2	ECOBATÍMETRO SDH-13A	49
4.3	RECEPTOR GPS GEODÉSICO GX1230 GG E ANTENA AX1202 GG	49
4.4	ECOBATÍMETRO SDE-28S E RECEPTOR GPS WS3910	50
<b>5</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>52</b>
5.1	AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO PLANIMÉTRICO DO SISTEMA GPS HEMISPHERE A21	52
5.1.1	Teste estático	53
5.1.2	Teste cinemático	56
5.1.3	Análise das coordenadas planimétricas do levantamento	58
5.2	AVALIAÇÃO DO PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER	60
5.2.1	Testes em área de controle	60
5.2.1.1	Teste estático	62

5.2.1.2	Teste cinemático . . . . .	63
5.2.1.3	Filtragem dos dados de profundidade . . . . .	66
5.2.2	Estudo de caso Reservatório Passaúna . . . . .	68
5.2.3	Aplicação Rio Taquari . . . . .	71
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>73</b>
6.1	TESTES GPS HEMISPHERE . . . . .	73
6.1.1	Teste estático . . . . .	73
6.1.2	Testes cinemático . . . . .	76
6.2	TESTES PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER (ADCP) .	83
6.2.1	Teste estático . . . . .	83
6.2.2	Testes cinemáticos . . . . .	92
6.2.2.1	Área de controle - ROD x SBES . . . . .	95
6.2.2.2	Área de controle - ROD x ADCP . . . . .	96
6.2.2.3	Área de controle - SBES x ADCP . . . . .	102
6.3	ESTUDO DE CASO: REGIÃO DO <i>BUFFER</i> DO RESERVATÓRIO PAS- SAÚNA . . . . .	109
6.4	APLICAÇÃO: RIO TAQUARI . . . . .	121
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>135</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de ambientes aquáticos é de fundamental importância, pois destes locais são retirados grande parte dos recursos como água, alimentos de origem vegetal e animal, entre outros que são consumidos diariamente. Porém, devido a sua dinâmica e aos fatores econômicos é difícil realizar um monitoramento contínuo, sendo necessário planejamentos para coleta de dados que representem com fidedignidade a área em estudo. A constante modificação e adaptação do meio, causada por ações naturais ou antrópicas, tornou o conhecimento destas mudanças necessário para tomada de medidas mitigadoras, conservação dos recursos existentes e preservação da qualidade da vida humana.

Nesse contexto, o ser humano precisou procurar maneiras de entender os processos em ambientes com diferentes características. Uma das formas de obter informações para análise desses eventos foi a partir da execução de levantamentos batimétricos. Em áreas costeiras e rios, a batimetria é fundamental para detecção de estruturas que possam causar risco a navegação das embarcações. Serve como subsídio para projetos de engenharia, simulação de dispersão de poluentes em situações de vazamentos (seja de embarcações ou de dutos submersos), plano de evacuação em casos de inundações, dentre outras diversas aplicações.

Uma das grandes preocupações no âmbito da engenharia é o processo de assoreamento, que reduz a eficiência de navegação em canais e de produção de energia elétrica quando se refere a reservatórios. Onde o comprometimento do reservatório devido ao assoreamento pode causar: a redução do armazenamento de água, danificar turbinas, diminuir a eficácia do controle de cheias, redução na eficiência de geração energia, problemas na estrutura da barragem, proliferação de algas, aumento da turbidez da água, degradação da qualidade da água, e diminuir a vida útil do reservatório.

O levantamento batimétrico sistemático em corpos aquáticos é uma necessidade para determinação da disponibilidade hídrica através das curvas cota x área x volume, bem como, verificar a forma do reservatório, do cone de dejeção de sedimentos, e diversas outras informações. Tais medições podem indicar ainda a qualidade ambiental das águas, bem como a flora e fauna que nele habitam (ANA, 2013). Do ponto de vista da hidroeletricidade, tais medidas são relevantes no que tange à manutenção da qualidade e quantidade de água para uso direto na geração de energia. Visto que, em um país como o Brasil com 64% da sua matriz de geração de energia elétrica é composta por fontes hídricas (Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Existem especificações técnicas que descrevem quais equipamentos podem ser usados para o monitoramento de ambientes aquáticos e quais as precisões mínimas para

obter um levantamento de qualidade de acordo com cada aplicação. A Agência Nacional de Águas (ANA) produziu em 2010 um documento que aborda os requisitos para execução de levantamentos batimétricos baseado na Resolução 003/2010 redigido em conjunto com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Consta nas orientações que a profundidade deve ter um erro menor ou igual a 0,2 metros, e que a precisão do posicionamento planimétrico da embarcação deve ser de 2 a 5 metros (ANA, 2013).

No caso de ambientes costeiros e hidroviários a sondagem se faz necessária para estudos sobre a navegabilidade de um canal, podendo ser utilizados sondadores de feixe simples, multifeixe ou sistemas de sondagem laser transportados (IHO, 2005b). A precisão exigida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, a qual se baseia nos padrões internacionais da *International Hydrographic Organization*, é variável no que se refere a determinação da profundidade e pode ser calculada a partir da equação disponível no documento. Para o posicionamento planimétrico a precisão exigida é de 2 metros (IHO, 2005a).

O acelerado desenvolvimento de novas tecnologias, adicionados aos eventos que estão alterando os ambientes de forma drástica e o estado de calamidade hídrica que várias regiões estão enfrentando, enfatizam a importância do monitoramento contínuo. O custo mais elevado, devido aos fatores econômicos, na execução da coleta de dados batimétricos usando os métodos convencionais provocam nas entidades executantes a necessidade de novas pesquisas no que concerne a otimização desses equipamentos para outras finalidades além daquelas definidas na sua criação. Essa adaptação, torna-se uma alternativa de redução de tempo de coleta de dados que pode ser investido no aumento da frequência desse monitoramento.

O ADCP, por exemplo, foi desenvolvido inicialmente para medir as velocidades da água ao longo de sua profundidade, e assim possibilitar o cálculo da vazão. Todavia, trabalhos como de Wilson, Morlock e Baker (1997) e Pinheiro et al. (2016) apresentam o potencial de coletar dados de batimetria simultaneamente às medições de velocidades com ADCP. Outros diversos autores como Gonzaga (2017) e TÚLIO e GAMARO, P.E.M. MALDONADO (2011 apud GAGG, 2016) <sup>1</sup> utilizaram o ADCP para obter a batimetria de suas respectivas áreas de interesse. No entanto, a falta de validação e sistematização do processamento observado em trabalhos citados na Tabela 1 ainda proporcionam questionamentos quanto a viabilidade do ADCP para medição de profundidade.

Se houvesse um método de pós-processamento para os dados de profundidade do ADCP que proporcionasse uma acurácia aceita pelas especificações técnicas haveria uma redução de recursos e tempo de coleta. Isso possibilitaria o aumento da frequência dos levantamentos, oferecendo uma abundância de informações que serviriam como subsídio

<sup>1</sup> TÚLIO, S.; GAMARO, P.E.M. MALDONADO, L. Avaliação do uso do medidor de vazão Doppler com feixe vertical em levantamentos batimétricos. *XIX Simpósio Bras. Recur. Hídricos*, 2011.

Tabela 1 – Resumo dos autores que utilizaram o ADCP, seja com o feixe vertical (VB) e/ou feixes inclinados por efeito Doppler (DB), para medição de profundidade. Em alguns casos a acurácia da profundidade foi analisada e validada a partir de outro método, porém nenhum deles apresentou um método geral de processamento dos dados.

Autor	Profundidade		Validação	Acurácia	Processamento
	VB	DB			
Wilson, Morlock e Baker (1997)		X	X	X	
Trump e Marmorino (1998)		X	X		
Fosness e Dietsch (2015)		X			
Fukuda, Hiramatsu e Harada (2016)	X	X	X	X	
Pinheiro et al. (2016)		X			
Heeto, Ali e Yousif (2017)	X				
Kasvi et al. (2019)	X	X			
Binh, Kantoush e Sumi (2019)		X			
Ratton (2020)	X	X			

para o melhor planejamento e gerenciamento desses ambientes.

O grande desafio é entender as limitações e vantagens do conjunto M9 (ADCP e GPS) voltado à coleta de dados batimétricos, visto que para atingir as precisões preconizadas pelas especificações técnicas, é necessário conhecer a acurácia tanto da profundidade quanto das coordenadas planimétricas. Sendo assim, efetuar levantamentos batimétricos com qualidade é imprescindível para que se obtenham informações que representem a realidade. Ou seja, estudos são fundamentais para que se entenda qual o procedimento a ser executado na coleta dos dados batimétricos, e a procedência dos potenciais erros que podem estar agregados ao levantamento.

Nesse contexto, esta pesquisa propôs uma sistematização de um método de análise, filtragem e processamento dos dados de profundidade obtidos com o ADCP. Para atingir tal objetivo enumera-se os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a precisão e acurácia dos dados de posicionamento do GPS Hemisphere do conjunto RiverSurveyor M9 utilizando o método RTK;
- Verificar possíveis interferências externas (obstáculos e outros sensores acústicos) que venham a causar alteração nos dados de profundidade do ADCP RiverSurveyor M9;
- Verificar a acurácia dos dados de profundidade do ADCP RiverSurveyor M9 em relação à um sensor convencional; e
- Analisar o desempenho do ADCP RiverSurveyor M9 quanto às exigências das especificações técnicas (ANA e IHO).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

De acordo com as especificações técnicas vigentes no Brasil, determinadas pela (Marinha do Brasil, 2017) e (ANA, 2013), a coleta de dados batimétricos pode ser realizada utilizando medidores acústicos como o ecobatímetro monofeixe (SBES) e multifeixe (MBES). Existem procedimentos de avaliação da qualidade, como a incerteza vertical total (TVU - do inglês *Total Vertical Uncertainty*) e incerteza horizontal total (THU - do inglês *Total Horizontal Uncertainty*), que devem ser seguidas para validação de um levantamento batimétrico. Uma vez que o objetivo desta pesquisa é desenvolver uma sistematização de um método de análise, filtragem e processamento dos dados de profundidade obtidos com o ADCP, ferramentas como a estatística e sistema de informação geográfica (SIG) podem auxiliar no entendimento do comportamento dos dados e na avaliação da sua qualidade.

### 2.1 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

A batimetria é um método geofísico utilizado para medir a espessura da coluna d'água em ambiente marinho, lacustre ou fluvial e tem por finalidade a determinação do relevo do fundo marinho. As profundidades podem ser obtidas de forma direta com uso de prumo de mão, estádias ou de forma indireta, com uso de ecobatímetros monofeixe e/ou multifeixe (FERREIRA, 2013). No entanto, quando existe além das profundidades o interesse na coleta de outros parâmetros - como características físicas das massas d'água, tipo de sedimento, qualidade da água - relacionadas à área de estudo, o levantamento é denominado como um levantamento hidrográfico.

O objetivo geral de um levantamento batimétrico em reservatório é construir um mapa batimétrico do fundo do lago, ou seja, a determinação de seu relevo submerso, que possa ser comparado com um mapa topográfico previamente gerado (BRUK, 1985). A partir da batimetria é possível determinar o volume e a detectar a distribuição do sedimento acumulado durante um período de tempo específico (EAKIN, 1939 apud MATOS, 2012)<sup>1</sup>.

Inicialmente, a profundidade era obtida a partir da distância entre a superfície da água e o fundo utilizando métodos diretos como uma haste graduada ou um prumo de mão. Nos levantamentos hidrográficos atuais, a profundidade é determinada a partir da observação do tempo de viagem das ondas acústicas. Um pulso acústico transmitido por um transdutor viaja através da coluna de água e então é refletido pelo fundo de volta para o hidrofone. Uma ecossonda básica usada para medir o tempo de ida e volta do pulso emitido pelo sensor através da coluna de água, consiste em um transdutor eletromecânico (emissor e receptor) e um gravador. O transdutor tem como função converter a energia

<sup>1</sup> EAKIN, H. M. *Silting of reservoirs*. Washington, D.C., 1939. v. 524, 168 p.



elétrica em energia mecânica, enviar o sinal acústico na água, receber o eco do sinal acústico e convertê-lo em sinal elétrico novamente. A profundidade  $Z$  da equação 2.1 é calculada pelo tempo de transmissão e recepção do sinal acústico  $\Delta t$ , onde  $c$  na Equação 2.2 é a velocidade do som na água (que pode variar ao longo da coluna d'água vertical devido aos efeitos de densidade criados por variações de temperatura ( $T$ ) e salinidade ( $S$ ) (SCIORTINO, 2010).

$$Z = c \frac{\Delta t}{2} \quad (2.1)$$

$$c = f(S, T) \quad (2.2)$$

Uma ecossonda pode operar em diversas frequências, com frequências entre 12 e 50 kHz para águas profundas (maior que 1500 metros) e frequências acima de 200 kHz para regiões de águas rasas<sup>2</sup> com profundidades menores que 100 metros (IHO, 2005b).

A execução de levantamentos batimétricos requer alguns procedimentos técnicos básicos de campo para a instalação e configuração dos equipamentos. De modo geral para medidores acústicos os autores De Souza (2011), Byrnes, Baker e Li (2002) e IHO (2005b) descrevem as principais fontes de erros presentes em uma sondagem devido a:

- **Falta de sincronismo entre sensores** ocasiona o armazenamento incorreto da atitude da embarcação correspondente ao momento de transmissão ou da recepção do sinal acústico e proporciona um deslocamento das coordenadas da feição detectada;

- **Determinação da temperatura e salinidade** interferem na velocidade de propagação do som na água, e consequentemente, provoca erros nas coordenadas finais da profundidade. Um corpo d'água sofre variações sazonais e diárias de acordo com a sua posição geográfica, sendo difícil determiná-la com exatidão através de previsões. Nesse sentido, é necessário realizar medições *in situ* para inserir as informações precisas no equipamento e dessa forma serem feitas as correções quanto às variações desses parâmetros. Segundo a IHO (2005b) a variação de 1 °C provoca uma variação de aproximadamente 4,5 m/s na velocidade de propagação do som e 1,3 m/s para uma variação de 1‰<sup>3</sup> de salinidade;

- **Determinação do ângulo de disparo do feixe** devido à refração que leva em consideração o princípio básico descrito pela Lei de Snell-Descartes, em que as diferentes camadas de água faz com que o feixe sonoro sofra um desvio angular devido a variação do índice de refração do meio ao longo do perfil vertical;

<sup>2</sup> Considera-se comumente, profundidades menores que a metade do comprimento da onda superficial. Para maiores informações consultar IHO (1994)

<sup>3</sup> símbolo representa partes por mil

- **Atitude e movimentação da embarcação** podem ser minimizados por sensores inerciais que irão detectar os movimentos angulares, proporcionando as correções em tempo real (Figura 1).

- **Efeitos de maré** em ambientes costeiros podem ser gerados por erro na medição direta da maré ou por diferença da maré entre a área de sondagem e a medida no marégrafo devido à distância geográfica. Desta forma, é sugerido que se utilize um modelo de concordâncias da maré ou médias ponderadas a partir de dois ou mais marégrafos. Outra forma de minimizar essa diferença pode ser utilizando um GPS-RTK e posteriormente determinar a maré a partir de um modelo de diferenças entre o elipsoide de referência (Sistema de Referência WGS-84 para constelação NAVSTAR-GPS) e o Datum vertical utilizado.

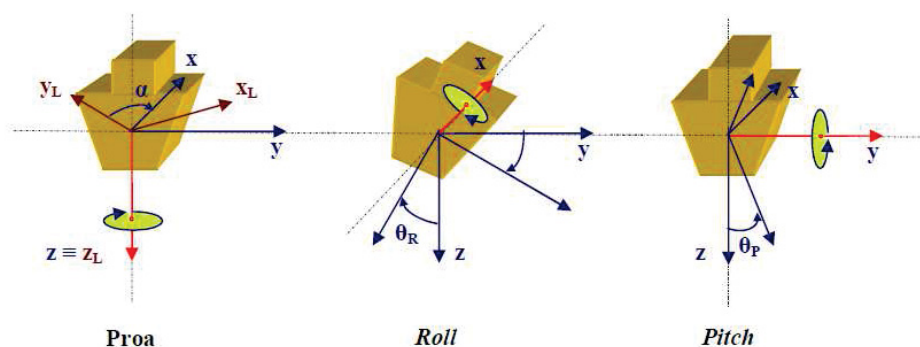


Figura 1 – Movimentos do navio que devem ser corrigidos por sensores.  
 Fonte: IHO (2005b).

Um levantamento batimétrico propriamente dito, compreende duas componentes: o posicionamento planimétrico da embarcação no instante da determinação da profundidade e a mensuração desta profundidade. No que concerne ao monitoramento de ambientes marinho e fluvial, para navegação, a Diretoria de Navegação e Hidrografia da Marinha do Brasil rege as premissas descritas na *NORMAM-25* (Marinha do Brasil, 2017), a qual é baseada no padrão internacional com base no *Manual on Hydrography* da IHO (2020). Enquanto que, para reservatórios de geração de energia elétrica a Agência Nacional de Águas disponibiliza o manual *Orientações para atualização das curvas cota x área x volume*, que surgiu a partir dos preceitos estabelecidos pela Resolução Conjunta ANA/ANEEL n° 03, de 10 de agosto de 2010, com objetivo de avaliar os processos de assoreamento.

A NORMAM-25 visa o levantamento em regiões marinha e fluvial. Como há um grande diferença em profundidade e uso dessas áreas, a norma divide os levantamentos em categorias "A" e "B". A categoria "A" visa um levantamento com uma acurácia dentro das especificações técnicas que permitam a utilização dos dados para atualização de documentos náuticos; e a categoria "B" é realizado sem o propósito de produzir elementos que sirvam para atualização de documentos náuticos. Neste trabalho foi utilizada a categoria "A",

que requer o cumprimento integral previstas na Publicação Especial nº 44 – “*Standards for Hydrographic Surveys*” (S-44) disponibilizada pela *International Hydrographic Organization* (IHO, 2020).

Segundo a NORMAM-25, a entidade executante deve preencher os requisitos determinados pela IHO (2020), que são divididas em quatro ordens de acordo com a profundidade e importância de detalhamento das vias/áreas navegáveis: **Especial, 1a, 1b e 2**. Devido às baixas profundidades (menores que 20 metros) nesse trabalho foi usada como referência a **Ordem Especial**, indicado para áreas de profundidades mais baixas onde o acesso abaixo da quilha é crítico, sendo necessário a detecção acurada de feições que possam provocar risco a navegação. A descrição do levantamento para essa ordem, descreve uma precisão planimétrica de no máximo 2 metros. Para a categoria "A" devem ser usados posicionadores GNSS de alta precisão (RTK, PPP ou DGNSS), que proporcionem informação de tempo a uma frequência inferior ou igual a 1 ms, permitindo uma correlação em tempo mais precisa entre o instante em que os feixes foram transmitidos e recebidos pelo transdutor. A qualidade do posicionamento é avaliado pela Incerteza Horizontal Total (THU - do inglês *Total Horizontal Uncertainty*) e considera a qualidade dos dados de acordo com o método de posicionamento usado na determinação das coordenadas da embarcação de sondagem e sincronismo entre o sistema de aquisição de dados batimétricos e seus sensores auxiliares.

No que tange a medição da profundidade, destaca-se a importância de sensores inerciais para compensação dos movimentos da embarcação (arfagem, balanço, caturro e proa). Para águas rasas (com profundidade inferior a 100 m) é necessário a utilização de ecobatímetro multifeixe de alta frequência (superiores a 200kHz), e para águas consideradas profundas (profundidade superior a 1.500 m) a baixa frequência (entre 12 e 50 kHz) é indicada. A precisão requerida depende da profundidade de interesse, onde a Incerteza Vertical Total (TVU - do inglês *Total Vertical Uncertainty*) é calculada a partir da equação 2.3. Onde  $a$  é uma constante em metros, determinada para cada ordem de levantamento, representa o somatório dos erros sistemáticos provenientes do processo de calibração em laboratório de todos os equipamentos utilizados na determinação da profundidade;  $b$  é um fator adimensional e expressa a parcela de erro médio quadrático que varia aleatoriamente com a profundidade; e  $d$  é a profundidade medida. Os valores de  $a$  e  $b$  são encontrados na tabela 1 da Publicação Especial nº 44 (IHO, 2020).

$$TVU = \pm \sqrt{a^2 + (bxd)^2} \quad (2.3)$$

Quanto ao monitoramento de reservatórios as *Orientações para atualização das curvas cota x área x volume* ANA (2013), as profundidades devem ser mensuradas com um equipamento de registro contínuo digital, com registro de ecogramas analógico ou digital, com precisão da medição isolada melhor ou igual a 20 centímetros, devidamente

instalado na lateral ou no fundo da embarcação, a qual deverá se deslocar a uma velocidade lenta, entre 2 a 5 nós, garantindo a coleta mínima de uma profundidade associada a uma coordenada planimétrica a cada 2 metros ao longo da linha de sondagem percorrida. Além disso, deve-se determinar, de forma acurada, a profundidade de imersão do transdutor e efetuar a aferição do ecobatímetro durante os dias de sondagem, usando a placa de aferição ou perfilador de velocidade do som lançados na profundidade média da área em estudo (CARVALHO et al., 2000; ANA, 2013). As orientações disponibilizam duas equações para calcular a distância entre as linhas de sondagem para as Usinas Hidrelétricas (equação 2.4) e para Pequenas Centrais Hidrelétricas (equação 2.5). Onde  $E_{st}$  é a equidistância das seções topobatimétricas transversais (Km),  $A$  é a área do reservatório em seu nível operacional normal (ha) e  $D$  é a extensão do reservatório considerando seu corpo principal, em nível operacional normal (Km).

$$E_{st} = \frac{0,35A^{0,35}}{D} \quad (2.4)$$

$$E_{st} = \frac{0,1A^{0,25}}{D} \quad (2.5)$$

Acoplado ao ecobatímetro deverá ser instalado um receptor GPS diferencial, visando à determinação da posição da embarcação durante a sondagem. O método comumente empregado é o posicionamento em tempo real (*Differential GPS* - DGPS), o qual consiste na determinação das coordenadas da estação móvel mediante o emprego das correções diferenciais geradas numa estação de referência. Estas correções são enviadas por um sistema de comunicação (p.ex. rádio de transmissão, celular, satélite geoestacionário) e dentro de um formato apropriado RTCM - *Radio Technical Committee for Maritime Service*. Quando são empregadas as correções diferenciais da fase da onda portadora ou da própria onda portadora tem-se o RTK (*Real Time Kinematic*), método mais aplicado nos levantamentos batimétricos (KRUEGER, 1996).

### 2.1.1 Medidores Acústicos

Como citado na seção anterior, os ecobatímetros multifeixe e monofeixe podem ser usados segundo as especificações técnicas para levantamento batimétrico em áreas costeiras e fluviais (IHO, 2020) e reservatórios de geração de energia elétrica (ANA, 2013). Além desses citados, ainda existe o ADCP, que não consta na lista dos equipamentos aceitos pelas especificações, mas realiza medições de profundidades por meio de feixes inclinados. Nessa seção serão descritos o princípio de funcionamento dos equipamentos que foram usados nessa pesquisa.

### 2.1.1.1 Ecobatímetro Monofeixe

O ecobatímetro monofeixe é composto de apenas um transdutor utilizado para a transmissão e a recepção dos pulsos acústicos. Um ecobatímetro funciona ao converter a energia elétrica, do gerador de pulso, em energia acústica. Como os transdutores não transmitem em todas as direções, a energia acústica é projetada na água em forma de um feixe orientado verticalmente. O pulso acústico emitido viaja através da coluna de água, atinge o fundo e é refletido de volta ao transdutor. O eco é a energia refletida que regressa ao transdutor. O sinal elétrico depois de amplificado é passado a um detector e comparado para o ajuste do limite para filtrar o ruído do sinal, e então o sinal de saída é visualizado e gravado (De SOUZA, 2007; MELO et al., 2010; SILVA, 2010).

As características de um ecobatímetro são determinadas pelos seus transdutores, sendo seus parâmetros: frequência acústica, dimensão da banda, abertura do feixe e comprimento do pulso. As frequências acústicas empregadas nos levantamentos batimétricos podem variar de 12 a 200 kHz. Quanto menor a frequência empregada maior será o alcance do sinal e a penetração no solo. Por exemplo, uma frequência baixa (LF) de 8 a 16 kHz possui um alcance maior que 10 km, já uma frequência alta (VHF) de 200 a 300 kHz possui um alcance menor que 100 m (IHO, 2005b).

Alguns cuidados são necessários para a obtenção dos dados e são listados pela IHO (2005b) como: a determinação dos valores de *offset* entre os sensores dos diversos sistemas instalados a bordo, bem como, estabelecer um ponto de referência no casco para auxiliar na medição da profundidade de imersão do transdutor durante o período da sondagem. Esta imersão deve ser verificada ao longo da sondagem, efetuando sua correta atualização no sistema de sondagem. O ecobatímetro monofeixe deve ser configurado com valores atualizados de velocidade do som para a área de sondagem visando a determinação correta das profundidades a partir dos tempos de propagação dos feixes (Figura 2).

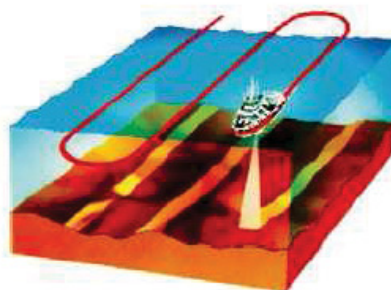


Figura 2 – Levantamento batimétrico utilizando um sensor monofeixe que faz a varredura em uma faixa estreita do leito.

Fonte: Kearns e Breman (2010).

### 2.1.1.2 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

Os perfiladores acústicos Doppler foram desenvolvidos com o objetivo de medir a velocidade da água a partir do efeito Doppler, ou seja, mediante a observação da mudança de frequência emitida e recebida pelos feixes que são independentes entre si (GAGG, 2016). O princípio básico do ADCP é a medição da velocidade da água usando o princípio físico do efeito Doppler (2.6). Em que a diferença entre a frequência do som transmitida e recebida é comumente conhecida como *Doppler Shift*, caso a fonte do som esteja em movimento em relação ao receptor (SONTEK, 2000).

$$F_{doppler} = -2F_{fonte} \frac{V}{c} \quad (2.6)$$

Onde:

$F_{doppler}$  = diferença entre a frequência transmitida e recebida (*Doppler Shift*);

$F_{fonte}$  = frequência do som transmitida;

$V$  = velocidade relativa das partículas em suspensão na água; e

$c$  = velocidade de propagação do som.

Os ADCP's são considerados como um medidor de correntes Doppler monoestático, pois o mesmo transdutor é usado para emissão e recepção do sinal acústico. Nesse tipo de medidor, o transdutor é desenvolvido para gerar um feixe de som estreito, com pulsos curtos em uma frequência conhecida. O som viaja pela água e reflete em todas as direções quando encontra com partículas em suspensão (sedimento, organismos, bolhas), e uma parte da energia refletida volta ao longo do eixo do transdutor, o qual é recebido pelo ADCP e calculada a diferença na frequência do sinal. Essa diferença medida pelo transdutor monoestático reflete a velocidade da água ao longo do eixo do respectivo feixe acústico (SONTEK, 2000).

Para os medidores de correntes, é considerada a reflexão do som pelas partículas na água, onde a mudança de frequência é proporcional a velocidade da água. Como observado na Figura 3, em que a frequência recebida ( $F_D$ ) sofre aumento quando o alvo se move em direção ao pulso acústico ( $F_0$ ) e o contrário acontece quando o receptor se move na mesma direção do pulso emitido (SONTEK, 2000).

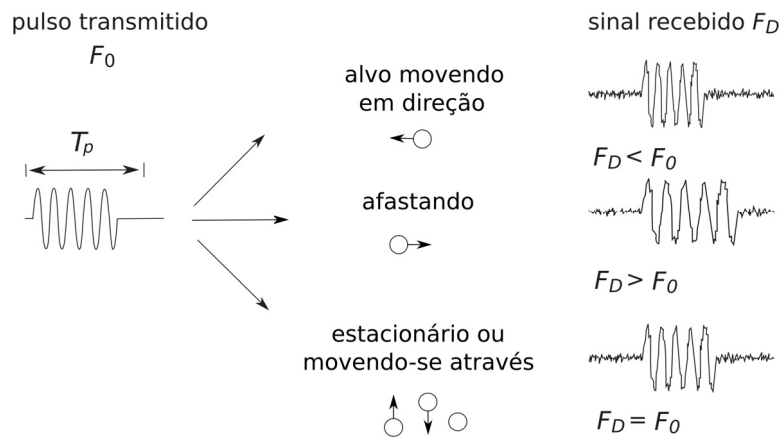


Figura 3 – *Doppler Shift* causado pela reflexão do som.

Fonte: Adaptado de Sontek (2000).

No entanto, existem 3 regiões que o ADCP não consegue realizar medições de velocidade, devido a interferências físicas e limitação do sensor. Em frente ao transdutor existe uma pequena região chamada de *blanking distance*, onde ocorre a recuperação do ruído devido à influência de reverberação do pulso acústico. Próximo ao fundo, por possíveis contaminações na última célula, quando esta, está tocando parcial ou totalmente o leito ou por interferências dos lóbulos laterais no final do perfil; e próximo às margens devido à alta reflexão das paredes (SONTEK, 2013).

Apesar dessas regiões não serem medidas existem métodos para estimar as velocidades para essas áreas recomendadas pela indústria. Para a superfície e fundo a técnica conhecida como extrapolação do perfil de velocidade, em que utiliza a lei da potência proposta por Chen (1991) e Simpson & Oltmann (1990). A intensidade do sinal varia consideravelmente com as condições de operação do ADCP. Portanto, locais com a presença de estruturas devem ser cuidadosamente planejadas para evitar a interferência do sinal, ruído e obstruções na água, os quais podem ter efeitos significativos (SONTEK, 2013).

## 2.2 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITES (GNSS)

O GNSS surgiu durante o Sistema Global de Navegação por Satélites a 10ª Conferência de Navegação Aérea, em 1991, quando o ICAO (*International Civil Aviation Organization*) reconheceu que o sistema de navegação do século XXI proporcionaria um sistema global de navegação. Esse sistema se baseia em um conjunto de satélites artificiais que proporcionam dados de navegação e de observações em tempo real. Nesta conferência foram indicadas duas possibilidades: o GBAs (*Ground Based Augmentation System*) e o SBAs (*Satellite Based Augmentation System*). No primeiro caso, as constelações de satélites são aumentadas por estações instaladas em terra, e no segundo caso, este aumento se dá por satélites geoestacionários. As constelações de satélites mais empregadas atualmente são o



NAVSTAR-GPS (*NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*, sistema americano) e o GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*, sistema russo). Posteriormente contar-se-á com outras constelações como o GALILEO (*European Satellite Navigation System*, sistema europeu) e o BeiDou (sistema chinês). Estes sistemas são compostos por segmentos: espacial, de controle e do usuário (MONICO, 2008; HUINCA, 2014).

### 2.2.1 Métodos de Posicionamento

O posicionamento através do GPS diz respeito à determinação da posição de objetos em relação a um referencial específico, podendo ser realizado a partir de diferentes técnicas e observáveis, as quais fornecem níveis de precisão que variam desde algumas dezenas de metros até poucos milímetros (Figura 4). Normalmente, é efetuado a partir da fase de batimento da onda portadora e/ou da pseudodistância. Devido à precisão da medida da fase da onda portadora ser da ordem de milímetros, ela é a observável indispensável na obtenção de posicionamentos que requeiram melhor precisão. A pseudodistância (equação 2.7) é mais utilizada em posicionamentos com precisão de ordem métrica, pois utiliza o código para determinar a distância entre o satélite e o receptor. Sendo assim o posicionamento pode ser classificado em:

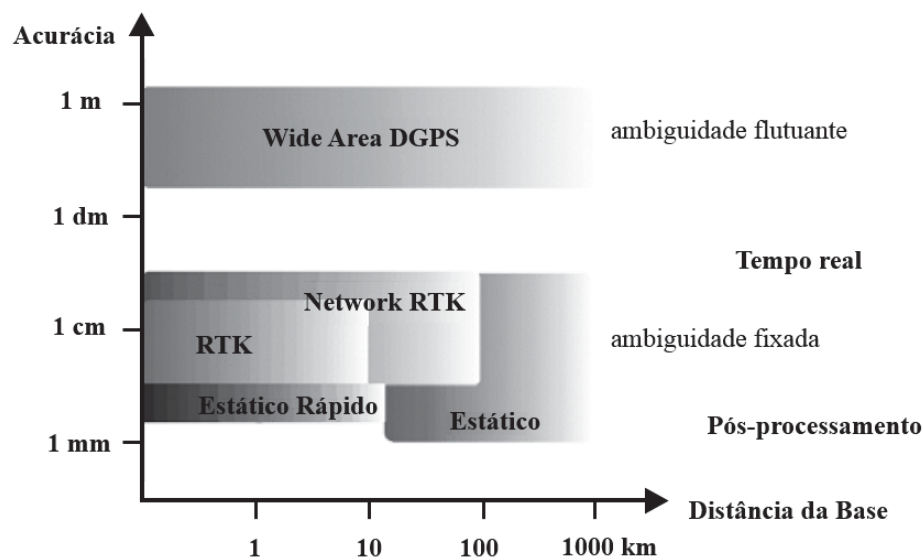


Figura 4 – Precisão dependente da linha de base para os diferentes métodos de posicionamento.

Fonte: Adaptado de Willgalis et al. (2003).

#### 2.2.1.1 Método Absoluto

Este método também é denominado na literatura de posicionamento por ponto ou isolado (Figura 5), pode ser realizado com as técnicas estática (antena estática) ou cinemática (antena em movimento). Esse método se caracteriza pela adoção de apenas



um receptor visando a determinação das coordenadas de um ponto ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  ou  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) sobre a superfície terrestre, referidas ao sistema de referência vinculado ao sistema de posicionamento por satélites adotado, por exemplo, para o GPS é o WGS-84 (G1150) (*World Geodetic System*, 1984 – refinado para a semana GPS 1150) (IBGE, 2008).

Em geral este método possibilita a determinação destas coordenadas em tempo real sendo então denominado de posicionamento por ponto (PP). Neste tipo de posicionamento normalmente são utilizados receptores de navegação, empregando-se para o cálculo da posição de pontos sobre a superfície terrestre, geralmente, a pseudodistância (PD) derivada do código C/A presente na portadora L1 e a mensagem de navegação. Neste método de posicionamento, no Serviço de Posicionamento Padrão (SPS), as precisões planimétricas alcançadas são de aproximadamente 13 metros e 25 metros (95%), horizontal e vertical, respectivamente (SEEBER, 2003).

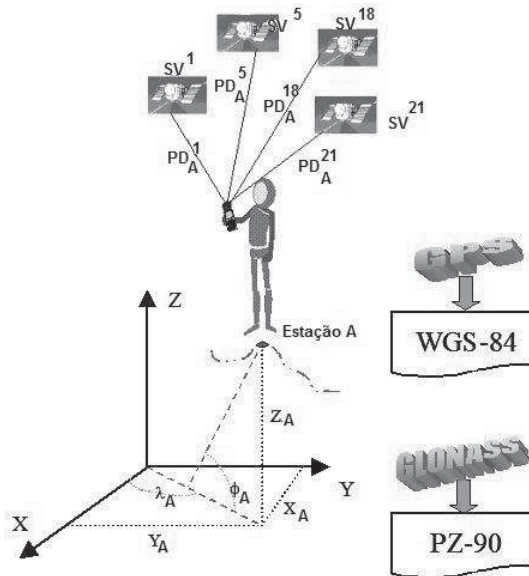


Figura 5 – Método de Posicionamento Absoluto.

Fonte: Krueger (1996).

A pseudodistância  $PD(t)$  nada mais é que a distância formada entre o satélite e o receptor – equação 2.7, envolvendo parâmetros como a época de observação ( $t$ ), distância geométrica entre a antena do satélite e a antena do receptor ( $R$ ), erro de sincronismo entre o relógio do receptor e o tempo GPS ( $dtu$ ), atraso na propagação do sinal (troposfera e ionosfera) entre a antena do receptor e a antena do satélite na atmosfera ( $dta$ ), erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS ( $dts$ ) e demais erros ( $\epsilon$ ) que envolvem ruído do receptor, efeito multicaminho, variação do centro de fase da antena, etc.

$$PD(t) = R(t) + cdtu(t) + cdta(t) + cdts(t) + \epsilon \quad (2.7)$$

No caso que a pseudodistância seja calculada pela fase da onda portadora a equação (2.7) é acrescida do termo das ambiguidades, que por definição, é uma incógnita

correspondente ao número de ciclos inteiros formados entre o instante de transmissão do sinal do satélite e da primeira recepção do sinal pelo receptor (SEEBER, 2003; CARVALHO, 1999). Os efeitos ionosféricos, a refração troposférica, multicaminho e outros erros não modelados, bem como a geometria dos satélites, afetam a solução das ambiguidades (MONICO, 2008).

### 2.2.1.2 Posicionamento por Ponto Preciso

Este método pode ser considerado um método absoluto, contudo existe o processamento dos dados coletados (códigos e fase das ondas portadoras) por receptores de uma ou duas frequências, empregando correções para os relógios dos satélites e as efemérides precisas, informações produzidas e disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*) e por centros associados. Este processamento se dá em geral por meio de programas científicos. Passando então a ser denominado de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

Os dados podem ser processados por diferentes centros como, por exemplo: AUSPOS (*Australian Surveying and Land Information Group's Online GPS Processing Service*) do Departamento de Recursos, Energia e Turismo da Austrália; CSRS – PPP (*Canadian Spatial Reference System*) desenvolvido pela NRCan (*Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*) e IBGE – PPP do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o qual faz uso do serviço online de processamento desenvolvido pela NRCan.

Esses serviços têm como vantagens: reduções de custos, processamento automatizado, uso total e automático dos programas do International GNSS Service (IGS), uso global, economia de tempo e centímetros de precisão (usando as observações da fase da onda portadora, e resolução das ambiguidades). Quando se empregam as pseudodistâncias derivadas do código C/A a precisão encontra-se na casa do metro, pois apenas os erros dos satélites e do receptor são modelados na solução (IBGE, 2008).

### 2.2.1.3 Método de Posicionamento Relativo Estático

No posicionamento relativo estático, tanto o receptor da estação base, quanto o da estação com coordenadas a determinar, rastreiam simultaneamente, os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de 20 minutos até horas, dias, meses e anos. Levantamentos realizados em linhas de base com comprimento inferior a 10 km, cujos receptores estejam estacionados em locais onde não haja ocorrência de obstrução e sob condições ionosféricas favoráveis, 20 minutos são suficientes para se conseguir solução das ambiguidades com receptores de simples frequência (IBGE, 2008).

Esta condição se modifica conforme as características da localização das estações e com o aumento do comprimento da linha de base. Para linhas de base maiores que 10 km recomenda-se a utilização de receptores de dupla frequência, bem como a utilização de

efemérides e do erro do relógio do IGS; permitindo obter precisão de ordem centimétrica (MONICO, 2008).

Na Figura 4 visualiza-se que a precisão obtida com este método está ligada diretamente a linha de base formada e a solução dos inteiros das ambiguidades. Para linhas de base de 10 km, por exemplo, se as ambiguidades forem fixadas a precisão relativa pode ser de milímetros, com linhas de base da ordem de 100 km tem-se cerca de centímetros para a precisão relativa.

#### 2.2.1.4 Método de Posicionamento Relativo Cinemático

Com precisão na ordem centimétrica (1 a 10 ppm), esse método consiste em se determinar um conjunto de coordenadas para cada época de observação, onde um receptor ocupa a estação base enquanto o outro permanece estacionado ou se deslocando sobre as feições de interesse. Portanto, no posicionamento cinemático, embora a antena esteja em movimento, a trajetória é descrita por uma série de pontos. Isso tem como consequência a necessidade do usuário dispor de no mínimo cinco satélites, para que haja a redundância e a solução seja passível de ser obtida (MONICO, 2008; IBGE, 2008). Neste método é importante se aplicar um método de inicialização, por exemplo, o receptor móvel permanece estacionado por alguns minutos num ponto qualquer antes de entrar em movimento, percorrendo a trajetória a ser descrita.

#### 2.2.1.5 DGPS

O conceito de posicionamento DGPS baseia-se na transmissão instantânea de dados de correções diferenciais (das pseudodistâncias determinadas pelo código e/ou código suavizado pela portadora), do receptor instalado na estação de referência ao receptor que percorre os vértices de interesse ou a trajetória a ser descrita. Desta forma, proporciona o conhecimento instantâneo de coordenadas precisas dos vértices ocupados e das trajetórias percorridas (IBGE, 2008).

No modo convencional os dados de correção diferenciais são transmitidos por meio de um link de rádio instalado nas estações de referência e móvel. Segundo Krueger (1996) a precisão alcançada com o emprego das correções do código C/A pode ser de 1 a 5 metros com a SA desativada, dependendo ainda da distância entre a estação de referência e a móvel.

Se o usuário emprega a correção diferencial do código suavizado pela onda portadora, que consiste no fato de que as observações da fase da portadora são utilizadas para refinar as observações do código mediante a um método de filtragem, onde a precisão obtida é inferior a 3 metros (KRUEGER, 1996). Estas precisões eram muito importantes quando a SA estava ativada, por isto este método diferencial foi desenvolvido e aplicado em larga

escala antes do ano 2000.

#### 2.2.1.6 RTK - *Real Time Kinematic*

O conceito de posicionamento pelo RTK tem fundamento análogo ao DGPS, em que a aplicação desse sistema possibilita uma minimização da influência dos erros do relógio dos satélites, das efemérides e da propagação do sinal na atmosfera. Porém as correções diferenciais são calculadas para o código, código suavizado pela portadora ou fase da onda portadora (SEEBER, 2003). As soluções encontradas são provenientes da linha de base formada, conforme Figura 4, na qual se visualiza que para a linha de base de até 10 km a precisão é inferior a alguns centímetros.

Um fator que limita a área de abrangência para a realização de levantamentos por RTK convencional é o alcance de transmissão das ondas de rádio. Basicamente, o alcance máximo é definido em função da potência do rádio e das condições locais em termos de obstáculos físicos. A utilização deste método, para determinação de limites artificiais, está condicionada a solução do vetor das ambiguidades como inteiro (solução fixa) (INCRA, 2013).

Nos dias atuais esta técnica pode ser aplicada enviando-se as correções diferenciais por meio da internet e da telefonia celular. Um exemplo de serviço disponível no Brasil é o RBMC-IP (Serviço da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – Protocolo Internet). Este é um serviço gratuito, implantado em 2009 e do qual participam 138 estações ativas da RBMC. A conexão é via internet e o protocolo utilizado é o NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Contudo a precisão está ligada diretamente ao comprimento da linha de base formada (estação da RBMC e a estação móvel).

### 2.3 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Devido a inviabilidade de coletar dados seja de elevação, precipitação, poluição, ruído, granulometria ou de qualquer outro fenômeno com uma distribuição contínua em toda a área de interesse, a alternativa é obter os dados a partir de locais de amostragem e estimar valores para o resto da região de estudo. A interpolação espacial é o processo que permite realizar esta estimação, em que o principal pressuposto é que pontos que estão mais próximos são mais parecidos do que aqueles que se encontram mais distantes (1ª lei da geografia de Waldo Tobler). Qualquer valor de uma localização deverá ser estimado com base nos valores dos pontos mais próximos. Existem diversos métodos de interpolação como *Inverse Distance Weighted* (IDW), *Spline*, Krigagem, entre outros (MARTINS; SOUSA, 2002).

O método de interpolação IDW é uma ferramenta de análise espacial que assume que cada amostra de ponto tem uma influência local que diminui com a distância. É

um método determinístico local, ou seja, faz previsões a partir dos pontos mensurados com vizinhos mais próximos daquela área, admitindo que os pontos mais próximos para o processamento da célula, tem influência mais forte do que aqueles mais afastados. O uso de interpolador IDW é recomendado quando a variável a ser mapeada diminui com a distância na localização amostrada (WEI; MCGUINNESS, 1973). O método é baseado na equação de Shepard disposta na equação 2.8 (FRANKE, 1982).

$$F(x, y) = \left[ \frac{\sum_{k=1}^n w_k(x, y) f_k}{\sum_{k=1}^n w_k(x, y)} \right], k = 1, 2, ..n \quad (2.8)$$

onde  $w_k(x, y) = d_k^{-\mu}$  ( $\mu$  é a potência, com valor padrão de 2, porém outros valores podem ser usados, e também podem variar para cada valor de  $k$ ).  $d_k = ((x - x_k)^2 + (y - y_k)^2)^{1/2}$ , é a função inverso da distância.

## 2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para análise da precisão da batimetria foram calculadas as diferenças em função da média aritmética (equação 2.9) do conjunto de dados como indicado na equação 2.10. Onde  $DP$  é o desvio padrão,  $x_i$  é a medida pontual com ADCP,  $\bar{x}$  é a média aritmética de todas as medições realizadas com o ADCP e  $n$  é o número total de medições. A acurácia ( $RMSE$ ) foi obtida a partir da equação 2.11, onde  $\hat{y}$  é o valor de referência (bastão graduado - ROD).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.9)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{y})^2}{n}} \quad (2.11)$$

Qualquer tipo de medição pode estar associados a erros que podem ser de caráter grosseiro (engano humano de leitura, anotação ou formato de leitura computacional, erro de identificação do objeto), sistemático (mal calibração de equipamento) ou aleatório (pequenas flutuação de uma causa desconhecida). São considerados pela literatura erros grosseiros, erros maiores que três desvios padrão ( $3\sigma$ ), em que mais de 0,997 da probabilidade de uma distribuição normal se encontra dentro do intervalo de  $6\sigma$  ( $\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma$ ) (DALMOLIN, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2013).

Nesse contexto, é importante verificar a existência desses erros antes de usar os dados para qualquer outra aplicação. As observações são representações numéricas de

quantidades físicas e possuem dispersão em relação a uma média. Apesar do erro aleatório ser desconhecido, geralmente a dispersão dos dados tende a apresentar uma forma senoidal (distribuição normal).

A forma mais usual de verificar a normalidade dos dados é a partir do teste de hipótese, onde se criam uma hipótese nula ( $H_0$ ) e outra não nula ( $H_1$ ). Portanto, a distribuição pode ser descrita por:

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{distribuição normal} \\ H_1 &: \text{distribuição não-normal} \end{aligned}$$

Onde o valor-p é a probabilidade de se obter uma estatística igual ou superior àquela observada em uma amostra a um nível de confiança ( $\alpha$ ) usual de 5%. Se valor de  $p > \alpha$ , aceita-se a hipótese  $H_0$ , caso contrário aceita-se a hipótese  $H_1$ .

A normalidade dos dados pode ser verificada a partir diversos métodos de hipótese. Em estudo sobre os testes de distribuição dos dados, foram analisados os resultados de oito testes, incluindo Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk. Segundo Torman, Coster e Riboldi (2012), o teste de Shapiro-Wilk é o método mais indicado para grandes amostras. O teste é definido pela equação 2.12, onde  $a_i$  é o coeficiente tabulado por Sarhan & Greenberg (1956),  $y_i$  é o dado observado,  $\bar{y}$  é a média amostral e  $n$  é o tamanho amostral (SHAPIRO; WILK, 1965).

$$W = \left[ \sum_{i=1}^n (a_i - y_i) \right]^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.12)$$

A etapa seguinte deve ser a escolha de um teste estatístico para verificar se as diferentes amostras possuem diferenças significativas ou não. Para amostras com distribuição normal, os testes paramétricos são escolhidos, porém quando a distribuição não segue um comportamento gaussiano, os testes não-paramétricos são utilizados. Dentre eles: Mann-Whitney, Kruskal-Wallis, Friedman e Wilcoxon. Considerando a independência das observações desta pesquisa, o teste de Wilcoxon usado para verificar se as amostras ( $\theta$ ) possuem diferenças significativas ou não em relação à amostra de referência ( $\theta_0$ ) a um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). As hipóteses são:

$$\begin{aligned} H_0 &: \theta = \theta_0, \text{ não possuem diferença significativa} \\ H_1 &: \theta \neq \theta_0, \text{ possuem diferença significativa} \end{aligned}$$

O teste dos postos sinalizados de Wilcoxon é um teste de hipótese não paramétrico, equivalente ao teste paramétrico T-student. Serve para verificar se duas amostras independentes possuem distribuição contínua com medianas iguais, baseado na observação dos postos. A estatística dos postos sinalizados de Wilcoxon ( $T^+$ ) é uma soma dos postos positivos (equation 2.13), onde  $R_i\psi_i$  é o posto positivo dos valores absolutos. Hipótese nula ( $H_0 : \mu = 0$ ) impõe que cada amostra é simetricamente distribuída sobre a mediana ( $\mu = 0$ ), onde o valor ( $V_0(T^+)$ ) e a variância ( $var_0(T^+)$ ) são introduzidos nas equações 2.14

e 2.15, onde  $n$  é o número de observações (HOLLANDER; WOLFE; CHICKEN, 2014).

$$T^+ = \sum_{i=1}^n R_i \psi_i \quad (2.13)$$

$$V_0(T^+) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (2.14)$$

$$var_0(T^+) = \frac{n(n+1)(2n+1)}{24} \quad (2.15)$$

A versão normalizada de  $T^+$  é representada na equação 2.16, onde para  $H_0$  verdadeiro,  $T^*$  têm-se que,  $n$  tende ao infinito e distribuição assintótica  $N(0,1)$  e a teoria de aproximação normal é rejeitada  $H_0$  se  $|T^*| \geq z_{\alpha/2}$ ; caso contrário, aceita-se que as amostras advém do mesma população com mediana igual a zero (HOLLANDER; WOLFE; CHICKEN, 2014).

$$T^* = \frac{T^+ - \left\{ \frac{n(n+1)}{4} \right\}}{\{var_0(T^+)\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$



### 3 ESTUDOS SIMILARES NO CONTEXTO DE LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS UTILIZANDO ADCP

O processo de coleta e processamento de dados batimétricos são complexos e requerem um conhecimento específico de equipamentos e softwares. Com o surgimento do ADCP, apesar de inicialmente ter sido desenvolvido para medição de velocidade da água, diversos pesquisadores buscaram utilizá-lo para obtenção da profundidade, com o objetivo de aproveitar os recursos e esforços já investidos na coleta dos perfis de velocidade.

A U.S.Geological Survey (USGS) é uma das organizações que vem utilizando os dados de profundidade do ADCP desde a década de 90. Realizou levantamentos batimétricos com ADCP da empresa RD Instruments com frequência de 600kHz, ângulo de abertura de 20° em relação a vertical, com acurácia da profundidade de  $\pm 10$  cm. O objetivo foi calcular o volume dos reservatórios Morse e Geist localizados nos Estados Unidos, e comparar dados pretéritos para verificar a perda de armazenamento do reservatório devido ao assoreamento, bem como avaliar o uso do ADCP para levantamentos batimétricos (WILSON; MORLOCK; BAKER, 1997).

O controle de qualidade dos resultados obtidos com ADCP consistiu em comparar com medições manuais com uma haste, considerando limites a acurácia descrita pelo fabricante. O desvio padrão das profundidades para um número amostral de 41 pontos, foi de 0,088 metros, para profundidades entre 0,60 e 8,10 metros, encontrando-se dentro da acurácia estimada pelo fabricante. Mais de 120.000 pontos foram coletados em cada reservatório, mostrando maior praticidade na coleta de dados em relação ao método empregado na pesquisa.

Trabalhos no rio Lower Elwha (CURRAN et al., 2008) e no rio São Francisco (FOSNESS; DIETSCH, 2015) para análise da vazão, batimetria e correntes de velocidade foram realizados posteriormente pela USGS. No rio Lower Elwha foi usado um SBES para compor dos dados de batimetria simultaneamente a um ADCP de quatro feixes para medição das velocidades. Visando uma maior precisão planimétrica, contavam com receptores GNSS com correções diferenciais em tempo real (RTK).

No rio São Francisco, as profundidades não passaram por nenhum processamento, sendo usadas somente para redução das altitudes elipsoidais obtidas pelo receptor GNSS para leito do rio. Apesar da análise da acurácia do ADCP para batimetria Wilson, Morlock e Baker (1997), ao usar um SBES acoplado na embarcação junto ao ADCP para determinação da profundidade, Curran et al. (2008) indica que o ADCP ainda possui incertezas desconhecidas para essa finalidade.

Um trabalho similiar foi realizado por Heeto, Ali e Yousif (2017), usando o feixe



vertical do ADCP M9 da SonTek e um receptor GPS operando em modo RTK coletados e armazenados no *software RiverSurveyor*. O feixe vertical foi adicionado ao ADCP para medir a profundidade já que esta era obtida a partir da profundidade média dos quatro feixes inclinados. Devido ao feixe vertical não ser um feixe tão ruidoso como os feixes Doppler, o autor não descreve nenhum processamento dos dados de profundidade. A batimetria bruta foi aplicada na redução das altitudes elipsoidais para o leito do rio, gerando um mapa de altitudes. O volume de sedimento depositado foi calculado com base no mapa topográfico antes do enchimento do reservatório e os dados batimétricos, o qual foi considerado constante e usado para estimar a vida útil do reservatório.

A coleta de profundidades com ADCP que objetivou investigar as formas de leito em uma área costeira foi abordado por Trump e Marmorino (1998). Utilizaram um ADCP de quatro feixes e um posicionador DGPS em uma potencial área para detecção de formas de leito foi selecionada com o auxílio de imagens de radar aerotransportadas. Durante um período de 3 semanas de experimento foram detectadas sete formas de leito a partir dos dois métodos. Analisando os dados, foi observado um ruído inerente aos dados de saída do ADCP. Os efeitos puderam ser minimizados com a suavização das profundidades dos quatro feixes, usando o filtro de média móvel com uma janela de 17 pontos. Onde os dados processados do ADCP forneceram uma boa correlação espacial com as estruturas detectadas na imagem de radar.

Ratton (2020)<sup>1</sup> também desenvolveu um estudo para detecção de dunas em rio usando as profundidades coletados com ADCP e quantificou o transporte de sedimentos da região. A partir dos cinco feixes (um vertical e quatro Doppler) do ADCP M9 da SonTek e receptores GNSS operando em modo RTK executou dois levantamentos em uma mesma região. Os dados foram filtrados manualmente, onde visualmente foram eliminadas as medições que o pesquisador julgava discrepante. As profundidades foram aplicadas na redução das altitudes elipsoidais até o leito. Posteriormente foram gerados os modelos de elevação para os dois levantamentos, onde as diferenças entre os dois modelos proporcionaram variações no leito de até 1,5 metros de altura.

Um estudo foi conduzido no rio Tien (Vietnã) empregando um ADCP Rio Grande 600 kHz. Foi relatado inconsistências nos dados brutos devido à movimentação da embarcação, onde aplicou-se os filtros passa-alta e passa-baixa para eliminar dados espúrios. Posteriormente, a variação do nível superficial da água foi corrigido a partir de estações hidrológicas próximas à região do levantamento, gerando um arquivo de coordenadas associadas às suas respectivas profundidade. Os dados foram interpolados para fornecer um mapa batimétrico e seguiu com análises de sedimento (BINH; KANTOUSH; SUMI, 2019). Esses estudos ressaltam que quando se trata da análise de sedimentos, seja em suspensão ou de fundo, os ADCP's são amplamente usados devido a facilidade de obter e

<sup>1</sup> Tese de doutorado defendida em 02/08/2020

fornecer todas as informações necessárias (como SNR, velocidade e profundidade).

Limitações como a medição em águas rasas (menores que 0,60 m) foi citada por diversos autores, e está intimamente ligada à profundidade de imersão do transdutor na água (*draft*); zona diretamente abaixo dos transdutores em que o eco não pode ser recebido pelo transdutor devido a propriedades físicas (*blanking distance*) e a distância entre partes sucessivas da transmissão de reverberação pelo ADCP (*lag*) (WILSON; MORLOCK; BAKER, 1997; HEETO; ALI; YOUSIF, 2017). Porém, modelos mais modernos como M9 da SonTek já apresentam uma faixa de 0,20 m a 80 m, considerando menores profundidades. A velocidade constante da embarcação, como em qualquer levantamento batimétrico, é extremamente importante para evitar ou pelo menos minimizar o erro de não sincronismo na medida da profundidade e da posição planimétrica da embarcação em um determinado instante de tempo, o qual pode estar associado as variações na atitude da embarcação.

Trabalhos que utilizam as profundidades do ADCP como referência para validação da batimetria com CTD e de sensoriamento remoto foram elaborados por Fukuda2016 e Kasvi et al. (2019), respectivamente. Apesar das análises mostrarem resultados positivos, não há descrição de processamento dos dados do ADCP antes de qualquer análise. As publicações citadas na Tabela 2 não abordam as técnicas de processamento nem análises quanto a acurácia das medições de profundidade obtidas com o ADCP em relação à um método convencional utilizando um SBES.

Mediante aos trabalhos expostos verifica-se que muitos utilizam os dados de profundidade do ADCP para análises ambientais, quer seja qualidade da água, sedimento, determinação de volume de uma área submersa, etc. Porém a falta de sistematização no processamento dos dados batimétricos obtidos com o ADCP, pode acarretar em erros inviabilizando a comparação de épocas distintas de uma mesma região. No próximo capítulo serão apresentados os métodos aplicados nesta pesquisa para sistematização do processamento de dados profundidade do ADCP, os quais possibilitam alcançar os objetivos descritos capítulo 1.

Tabela 2 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos com o ADCP para determinação da profundidade

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Posicionamento</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Validação</b>
Wilson, Morlock e Baker (1997)	Avaliar o uso do ADCP para levantamentos batimétricos e cálculo do volume em reservatórios	GPS de navegação e DGPS	ADCP 4 feixes	medições manuais com uma haste graduada
Trump e Marmorino (1998)	Caracterização da batimetria em pequena escala	DGPS	ADCP 4 feixes	cartas náuticas
Curran et al. (2008)	Análise de dados batimétricos, vazão e correntes de velocidade em rio	RTK	SBES	Sem validação
Fosness e Dietsch (2015)	Levantamento hidrográfico em rio	RTK	ADCP 4 feixes	Sem validação
Fukuda, Hiramatsu e Harada (2016)	Aplicabilidade do ADCP e de um CTD para medição de profundidade	RTK	ADCP 5 feixes	medições manuais com uma haste graduada
Pinheiro et al. (2016)	Comparação de dados batimétricos coletados com ADCP e SBES	DGPS	ADCP 4 feixes	
Heeto, Ali e Yousif (2017)	Criação de um mapa batimétrico utilizando um ADCP	RTK	ADCP (feixe vertical)	Sem validação
Kasvi et al. (2019)	Comparação entre modelos batimétricos com ADCP e sensoramento remoto	DGPS	ADCP 5 feixes	Sem validação
Binh, Kantoush e Sumi (2019)	Analisar a vazão e carga de sedimentos a longo prazo	GPS	ADCP 4 feixes	Sem validação
Ratton (2020)	Caracterização de dunas e mapeamento de áreas de erosão/deposição	RTK	ADCP 5 feixes	Sem validação

## 4 EQUIPAMENTOS

Foram utilizados para execução desta pesquisa, o CTD (do inglês *Conductivity, Temperature and Depth*) da marca CastAway que proporcionou a determinação de propagação do som na água, uma haste graduada para medição manual das profundidades, o conjunto RiverSurveyor M9 da SonTek, composto por um perfilador acústico Doppler (ADCP) e uma antena GPS modelo A21 do fabricante Hemisphere (seção 4.1); um ecobatímetro monofeixe modelo SDH-13A do fabricante Odom Hydrographic Systems (seção 4.2) e uma antena GPS AX1202 GG da Leica Geosystems (seção 4.3); e um ecobatímetro monofeixe modelo SDE-28S do fabricante South acoplado a um receptor GPS modelo WS3910 (seção 4.4). Os ecobatímetros monofeixe SDH-13A e SDE-28S possibilitam medição de profundidade a partir de um único feixe ( $A_{eco}$ ), sendo necessário agregar uma antena GPS para a determinação do respectivo posicionamento ( $E_a$ ,  $N_a$ ) e cálculo da velocidade de deslocamento da embarcação ( $u_{barco}$ ), como mostra a Figura 6.

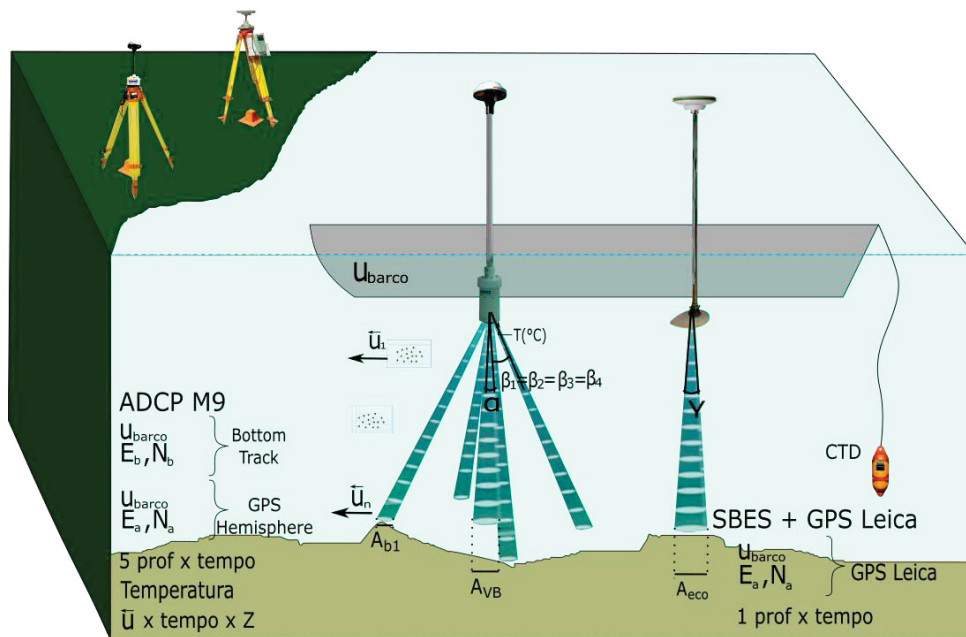


Figura 6 – Conjunto M9 (ADCP M9 + GPS Hemisphere) e ecobatímetro monofeixe SDH-13A conectado ao receptor GPS Leica instalados na embarcação.

Em contrapartida, o conjunto M9 fornece informações como velocidade do barco ( $u_{barco}$ ), coordenadas  $E_a$  e  $N_a$  a partir do GPS Hemisphere. Caso o levantamento seja realizado em ambiente com muita obstrução (vegetação, edificações e abaixo de pontes, por exemplo), que possam acarretar a perda de sinal do GPS, é possível obter informações da velocidade do barco ( $u_{barco}$ ) e trajetória da embarcação ( $E_b$ ,  $N_b$ ) a partir do módulo Bottom Track (BT). Adicionalmente, o ADCP possui um sensor de temperatura superficial

e medição das profundidades por meio de 5 feixes que trabalham simultaneamente ( $A_{VB}$ ,  $A_{b1}$ ,  $A_{b2}$ ,  $A_{b3}$ ,  $A_{b4}$ ), e perfis da velocidade da água utilizando os feixes inclinados ( $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n$ ).

#### 4.1 RIVERSURVEYOR M9

O ADCP modelo RiverSurveyor M9 da SonTek composto por 9 feixes, sendo um feixe vertical a 500 kHz com ângulo de abertura de  $8^\circ$ ; outros 4 operantes a uma frequência de 3,0 MHz, e 4 feixes a 1,0 MHz distantes  $25^\circ$  do feixe vertical, com ângulo de abertura de  $3^\circ$ . Segundo o fabricante, é possível realizar levantamentos em ambientes com profundidades entre 0,2 e 80 metros com o feixe vertical e entre 0,2 até 40 metros com os feixes inclinados, onde a acurácia da medição é de 1% da profundidade medida, em que a resolução máxima pode chegar a 0,001 metros (Tabela 3).

O sistema possui um módulo de energia e comunicação (PCM - do inglês *Power and Communications Modules*), uma prancha para instalação dos equipamentos (Figura 7), uma estação base e outra móvel com posicionamento em tempo real possibilitando obter uma coordenada planimétrica com precisão submétrica. A sonda também possui uma bússola para referenciar as medições e um inclinômetro para corrigir inclinações devido à movimentação da embarcação.

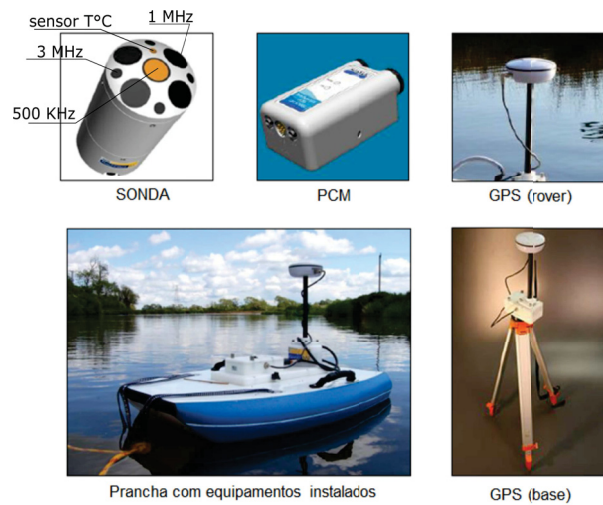


Figura 7 – RiverSurveyor M9 composto por uma sonda, PCM, GPS, e prancha.  
Fonte: Adaptado de SonTek (2015).

O conjunto completo M9 inclui duas antenas GPS da marca Hemisphere GNSS (base e rover) (Figura 7), os quais utilizam a constelação NAVSTAR-GPS, operando a uma frequência (L1), para determinar o posicionamento. Possui alcance base/*rover* de até 3 km, computador/*rover* 450 m até 1,50 km e opções de configuração com *Satellite-Based Augmentation System* (SBAS) e *Real Time Kinematic* (RTK) podendo chegar a acurácias horizontal menores que 1 m e 0,02 m, respectivamente. O SBAS é um sistema

que proporciona o posicionamento em uma determinada área incluindo as mensagens de efemérides transmitidas de satélites geoestacionários (Hemisphere GNSS, 2018).

Tabela 3 – Especificações técnicas do Riversurveyor M9.

Fonte: Adaptado de SonTek (2017)<sup>1</sup>.

Faixa de perfilagem — Distância	0,06 e 40m
Faixa de perfilagem — Velocidade	±20 m/s
Velocidade — Acurácia	±0,25% da velocidade medida ±0,2 cm/s
Velocidade — Resolução	0,001 m/s
Número de células	Até 128
Tamanho da célula	0,02 e 4m
Configuração do Transdutor	Nove (9) Transdutores Dual 4-feixes 3,0 MHz/1,0 MHz Janus 25° Ângulo Inclinado 0,5 MHz Feixe vertical
Profundidade — Faixa	0,20 e 80m
Profundidade — Acurácia	1% da profundidade
Profundidade — Resolução	0,001 m
Faixa para medição de vazão — Bottom-Track (BT)	0,3 e 40 m
Faixa para medição de vazão — RTK GPS	0,3 e 80 m
Medição de vazão — Cálculo	Processamento interno na PCM

A SonTek possui *softwares* como o RiverSurveyor e HydroSurveyor, os quais podem ser utilizados na coleta de dados do M9, e parceria com a empresa Xylem que disponibiliza em seu *software* de hidrografia (HYPACK) a coleta, edição e pós-processamento dos dados, entre outras ferramentas.

RiverSurveyor Live (RSL) - é um sistema específico para medir vazão em rios, correntes de água em 3D, profundidades, e batimetria de uma embarcação em movimento ou estacionária, utilizando somente o feixe vertical. O alto grau de acurácia e a simplicidade de uso permite medições com confiança sem ter que mudar as configurações de medição para uma condição de um rio específico (SONTEK, 2016).

HydroSurveyor (HS) - é uma plataforma para coleta de dados e foi desenvolvido para levantamento batimétrico, perfil de velocidade na coluna d'água e dados acústicos do fundo submerso como parte do levantamento hidrográfico, não calculando a vazão. Com a plataforma HS, é possível obter a sondagem da profundidade com 5 feixes, podendo monitorar a navegação, perfil de velocidades em toda a coluna d'água, compensação da correção da velocidade do som com CastAway-CTD, e solução do posicionamento integrado. O programa HS oferece uma plataforma de gravação e processamento que permite o usuário elaborar mapas batimétricos, usando uma grade de pontos apropriada. Adicionalmente, devido ao HS oferecer dois tipos distintos de navegação (GPS e BT), o sistema também possibilita solução do posicionamento planimétrico para locais com

<sup>1</sup> <http://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-M9-14>

restrição ou com cobertura intermitente do GPS, como abaixo de pontes e densa vegetação (SONTEK, 2014).

## 4.2 ECOBATÍMETRO SDH-13A

O ecobatímetro monofeixe modelo SDH-13A do fabricante Odom Hydrographic Systems (Figura 8), opera a uma frequência de 208 kHz, com abertura do feixe de  $8^{\circ} \pm 1^{\circ}$  capaz de detectar profundidades entre 0,35 e 123 metros com acurácia de 10 cm. Para a coleta e armazenamento de dados, requer um programa hidrográfico que reconheça o equipamento, por exemplo, o HYPACK. Para a determinação do posicionamento é necessário a sincronização com um GPS, de preferência com modo RTK ou diferencial, que também possua uma biblioteca compatível com o programa.



Figura 8 – Ecobatímetro monofeixe modelo SDH-13A, fabricante Odom Hydrographic Systems.

Fonte: Krueger (2006).

## 4.3 RECEPTOR GPS GEODÉSICO GX1230 GG E ANTENA AX1202 GG

Habilitado a receber sinais das constelações NAVSTAR-GPS e GLONASS, opera com as ondas portadoras e códigos. Possui 1 porta de energia, 3 portas seriais, 1 porta para o controlador e 1 porta para antena. As precisões horizontal e vertical com pós-processamento para levantamentos estático, cinemático e RTK, estão descritas na Tabela 4. Quando aplicado o método RTK, para transmissão e recepção de dados o receptor suporta os formatos RTCM V2.1/2.2/2.3/3.0/3.1. A mensagens de saída NMEA 0183 V3 ou dados de saída podem ser armazenados em cartão de memória de até 1GB ou em formato NMEA 0183 e a taxa de registro pode ser configurada entre 0,5 e 300 segundos.



Tabela 4 – Acurácias dos métodos de posicionamento fornecidas pelo fabricante Leica Geosystems.

Método	Acurácia	
	Horizontal	Vertical
Relativo Estático	5 mm + 0,5 ppm	10 mm + 0,5 ppm
Relativo Cinemático	10 mm + 1 ppm	20 mm + 1 ppm
RTK Estático	5 mm + 0,5 ppm	10 mm + 0,5 ppm
RTK Cinemático	10 mm + 1 ppm	20 mm + 1 ppm

Para compor o conjunto RTK é necessário um meio de comunicação, seja via rádio ou internet, para o envio das correções diferenciais em tempo real. Neste trabalho foi utilizado o rádio PDL High Power Base (PDL HPB) da Pacific Crest (Figura 9). Possui porta serial compatível com entrada RS-232, opera a uma velocidade de 1200 a 38400 baud, e controle de frequência sintetizada com capacidade de aproximadamente 1600 canais com espaçamento de canal de 25/12,5 kHz.



Figura 9 – A esquerda: antena AX1202 GG e receptor GX1230 GG. À direita: rádio modelo PDL HPB do fabricante Pacif Crest usado na transmissão das correções diferenciais da estação base para o *rover*.

Fonte: Leica Geosystems (2007) e Pacific Crest (2009).

#### 4.4 ECOBATÍMETRO SDE-28S E RECEPTOR GPS WS3910

O SDE-28S é um ecobatímetro com ângulo de abertura de 7°, operando a uma frequência de 200 kHz, com alcance entre 0,39 e 220 metros; e acurácia de  $\pm 0,1\%$  da profundidade. O conjunto conta com o GPS WS3910 do fabricante *Wi-Sys Communications Inc.* que a partir do método de posicionamento absoluto opera na frequência de 1575,42 MHz (L1) com disponibilidade de observação da constelação NAVSTAR-GPS. O fabricante não indica a precisão do equipamento, mas de acordo com testes realizados por Alves (2019), a acurácia 2D e 3D foram de 3,9 m e 4,0 m, respectivamente.





Figura 10 – Ecobatímetro monofeixe modelo SDE-28S do fabricante South Surveying & Mapping Instrument CO.,LTD. e receptor GPS WS3910 fabricado pela empresa Wi-Sys Communications Inc.<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> <https://www.yumpu.com/en/document/read/32828961/wi-sys-communications-inc-ws3910-gps-antenna-fa>

## 5 MÉTODOS

As análises do posicionamento planimétrico foram realizadas com o intuito de determinar a precisão e acurácia das coordenadas obtidas com GPS Hemisphere A21 considerando diferentes cenários de acordo com as especificações técnicas vigentes (seção 5.1). Referentes às profundidades foram realizados testes para a detecção de possíveis interferências em função do seu entorno (margens) e de sinais emitidos por outros sensores acústicos. O conhecimento do comportamento dos feixes inclinados do ADCP permitiu a sistematização das etapas de pós-processamento dos dados de profundidade obtidas com o ADCP (seção 5.2). Os resultados do posicionamento planimétrico e das profundidades foram avaliados quanto as especificações técnicas para levantamentos batimétricos da ANA (2013) e IHO (2020).

### 5.1 AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO PLANIMÉTRICO DO SISTEMA GPS HEMISPHERE A21

Os testes de posicionamento por GPS foram separados em testes estático e cinemático (figura 11), utilizando antena/receptor Leica modelo ATX1230 GG e antena/PCM Hemisphere modelo A21, ambos operando em modo RTK. Os experimentos foram feitos em duplicatas, onde variou-se a altura da antena para eliminação de erros sistemáticos no que concerne a identificação equivocada da altura da antena inserida nas configurações do receptor. A seção 5.1.1 trata do teste estático, que consistiu na melhor instalação do receptor em um ponto de coordenadas precisas para determinação da precisão e acurácia do posicionamento planimétrico. A seção 5.1.2 descreve o teste cinemático com o intuito de determinar a acurácia do posicionamento planimétrico frente a diferentes níveis de obstrução.

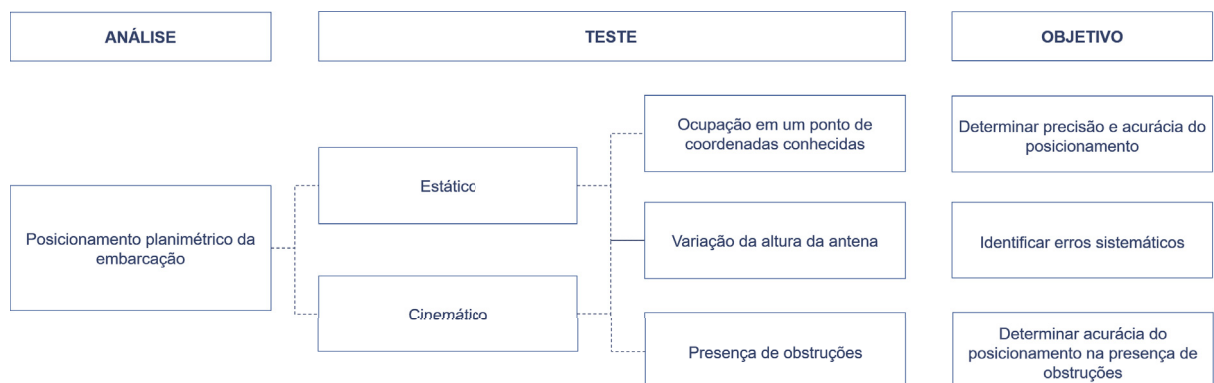


Figura 11 – Organograma das análises realizadas para o posicionamento planimétrico, utilizando o receptor Hemisphere A21, e seus respectivos objetivos.

### 5.1.1 Teste estático

Foram utilizados os marcos RM01 e RM03 (Tabela 5) para ocupação das antenas rover, localizados nas imediações do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH) da UFPR. Adicionalmente foram ocupados dois pontos (um ponto denominado **P01** próximo ao marco RM01 e o **P02** ao lado do RM03) para a instalação das estações de referências. As coordenadas precisas dos pontos **P01** e **P02** foram determinadas pelo método de posicionamento relativo estático em relação às coordenadas da estação UFPR, que compõe a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (Figura 12).

Tabela 5 – Coordenadas geodésicas dos pontos RM01, RM03, P01 e P02, no sistema de referência SIRGAS 2000, e seus respectivos desvios padrão, obtidos pelo método de posicionamento relativo estático.

Marco	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)
RM01	25° 26' 53,32363"S	49° 13' 51,34203"W	925,2188
$\sigma_{(RM01)}$	0,0002 m	0,0002 m	0,0005 m
RM03	25° 26' 54,56611"S	49° 13' 52,21132"W	923,7808
$\sigma_{(RM03)}$	0,0001 m	0,0000 m	0,0002 m
P01	25° 26' 53,35366"S	49° 13' 51,32400"W	924,9240
$\sigma_{(P01)}$	0,0001 m	0,0001 m	0,0004 m
P02	25° 26' 54,59487"S	49° 13' 52,18140"W	923,4537
$\sigma_{(P02)}$	0,0001 m	0,0001 m	0,0004 m

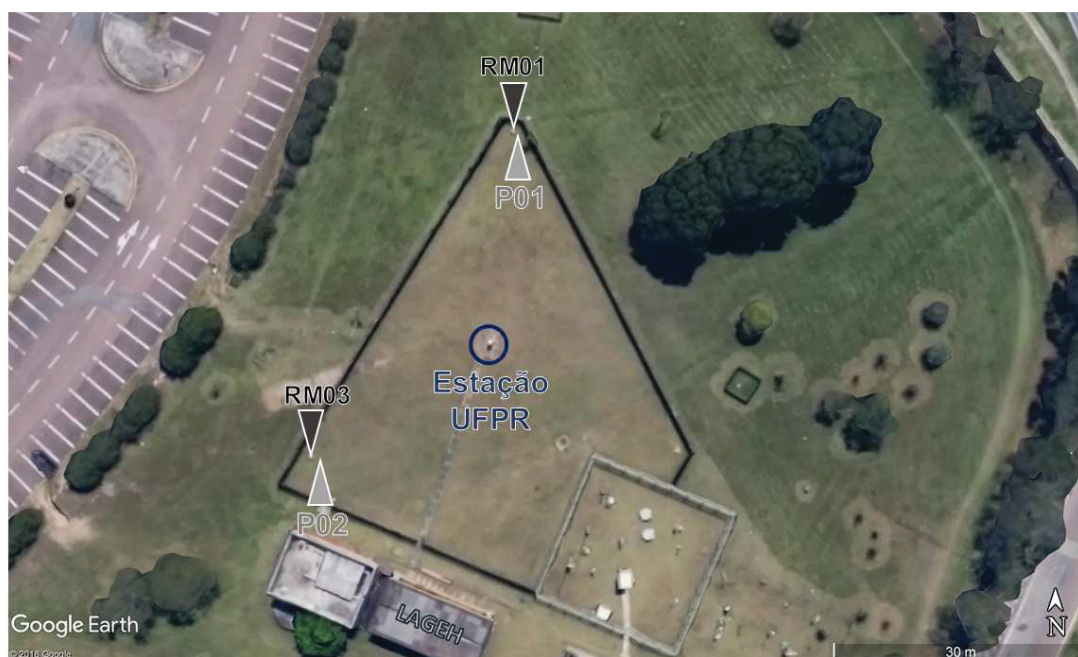


Figura 12 – Croqui da localização dos pontos RM01, RM03, P01 e P02 usados para o teste estático de precisão e acurácia com GPS.

Fonte: Adaptado de Google Earth (2018).

O teste estático objetivou determinar a precisão e acurácia do posicionamento a partir do GPS Hemisphere que compõe o conjunto M9 da Sontek. No teste estático 1 (Estáticos H1 e H2 - Figura 14) a estação de referência foi instalada no marco RM01 (Figura 13A) e antena rover no marco RM03 (Figura 13B), onde as coordenadas precisas do ponto da estação de referência foram inseridas para que o equipamento calculasse em tempo real as correções diferenciais e as enviasse à estação móvel, via comunicação a rádio, em conformidade com o método RTK. Foram realizadas duas ocupações variando a altura da antena rover (1,5 m e 2 m) para eliminar possíveis erros sistemáticos causados pela inserção da altura da antena em relação ao marco. As coordenadas obtidas em tempo real foram comparadas com as coordenadas precisas do marco RM03 (Tabela 5), e posteriormente, calculada as diferenças (valores mínimos, máximos e raiz do erro médio quadrático) obtidas com o emprego do GPS Hemisphere A21.

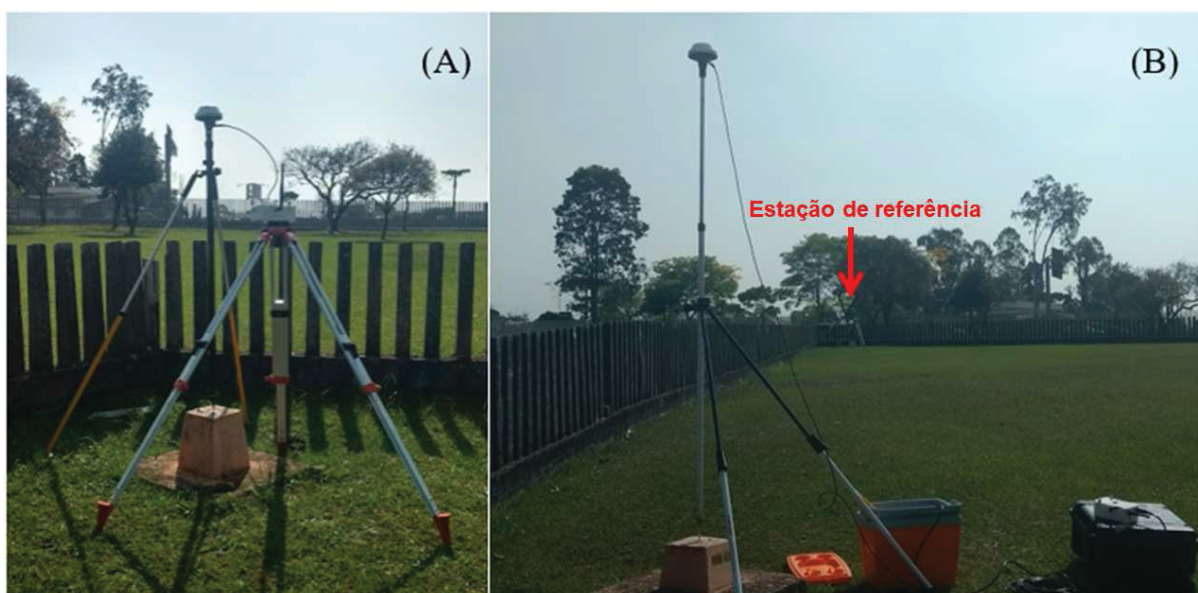


Figura 13 – (A) Estação de referência para RTK (SonTek), a qual irá calcular as correções diferenciais e enviar para *rover* via rádio, instalado na RM01 (B) *rover* instalado na RM03.

O teste estático 2 (LH1 e LH2 - Figura 14) consistiu em verificar a ocorrência de interferências entre as antenas e os sinais emitidos pelo rádio de comunicação quando em operação simultânea. Portanto, as estações de referência foram instaladas no marco RM01 e no ponto P01; e as antenas rover no marco RM03 e ponto P02 a uma mesma altura de 1,5 metros (LH1) e a alturas diferentes (LH2) onde a antena Hemisphere se encontrava a 2 metros e antena Leica a 1,5 metros do solo. Posteriormente, as coordenadas obtidas pelo GPS Hemisphere foram comparadas com as coordenadas precisas dos pontos (Tabela 5), possibilitando a verificação das discrepâncias entre os resultados.

Mediante os dois cenários, as precisões foram calculadas para estabelecer a melhor configuração das antenas/receptores GPS. Seguindo as especificações técnicas vigentes para

levantamentos batimétricos IHO (2020) e ANA (2013), os resultados foram classificados em apto ou rejeitado para tal finalidade de acordo com as precisões obtidas.

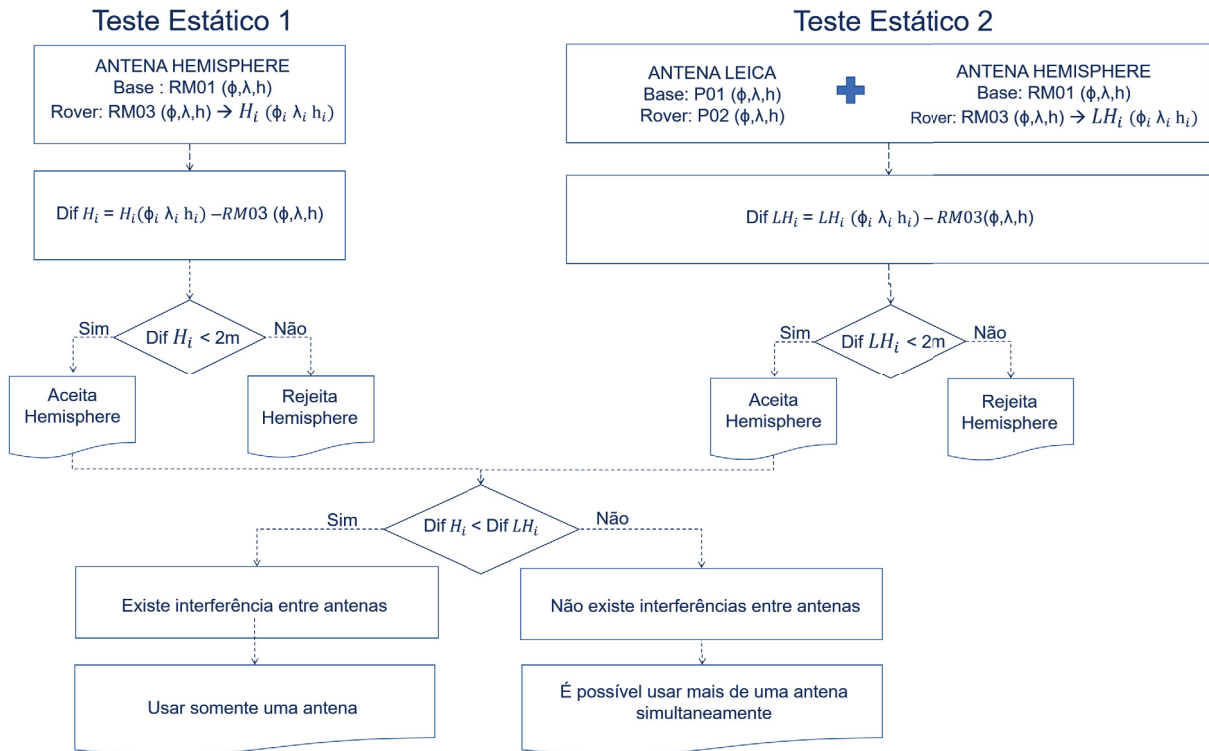


Figura 14 – Organograma da configuração dos equipamentos na coleta de dados e análises realizadas para o posicionamento planimétrico. Onde, RM01, RM03, P01 e P02 são pontos de coordenadas conhecidas  $(\phi, \lambda, h)$ ;  $\text{Dif } H_i$  é a diferença entre a coordenada medida, utilizando apenas um receptor ( $H_i$ ) ou dois ( $LH_i$ ) para o teste de interferências, e a coordenada precisa (RM03). Em caso da diferença do posicionamento planimétrico ser menor que 2 metros, aceita-se o receptor Hemisphere para levantamentos batimétricos.



### 5.1.2 Teste cinemático

Os testes cinemáticos foram realizados para verificar o alcance do sinal, comportamento na presença de obstruções e outros sensores, e a acurácia das coordenadas obtidas em uma condição similar a um levantamento batimétrico real em que a embarcação se encontra em constante movimento. O teste estático proporcionou as precisões e acurácias com a antena ocupando apenas um ponto, mas devido às correções diferenciais serem em tempo real, com o teste cinemático foi possível verificar se houve degradação da acurácia ocasionado pela movimentação da antena.

O teste cinemático 1 (H1 e H2 - Figura 16), consistiu em verificar o posicionamento da antena/receptor Hemisphere A21 em movimento operando isoladamente. A estação de referência instalada no marco RM03, e a antena rover em movimento passando pelos 11 vértices de coordenadas conhecidas que foram processadas anteriormente pelo método de posicionamento relativo estático, localizadas no gramado do Campus Centro Politécnico da UFPR (Figuras 15).



Figura 15 – Vértices de controle e marco RM03, utilizados nos testes cinemáticos.

No teste cinemático 2 (LH1 e LH2 - Figura 16), as estações de referência foram alocadas no marco RM03 e ponto P02 (Figura 12), com suas respectivas coordenadas precisas inseridas nos receptores, e as estações móveis se deslocaram simultaneamente a uma distância entre elas de aproximadamente 1 metro. A mesma trajetória foi realizada, passando pelos vértices de coordenadas conhecidas que foram determinados na área de controle. Uma segunda trajetória foi executada com alteração da altura da antena Hemisphere de 1,5 metros para 2 metros com intuito de evitar erros sistemáticos.

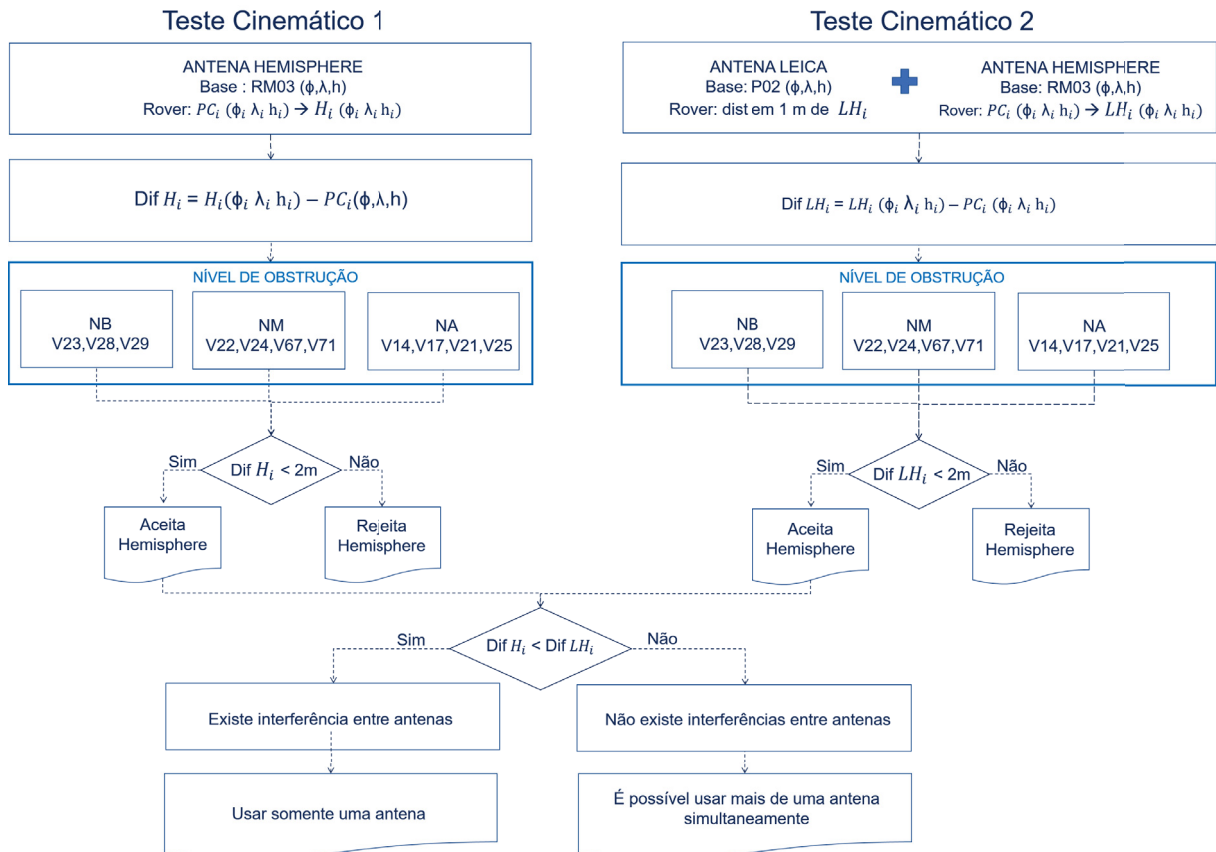


Figura 16 – Organograma da configuração dos equipamentos na coleta de dados e análises realizadas para o posicionamento planimétrico. Onde, RM03 e P02 são pontos de coordenadas conhecidas  $(\phi, \lambda, h)$  usados para alocação das estações base;  $Dif H_i$  é a diferença entre a coordenada medida, utilizando apenas um receptor( $H_i$ ) ou dois ( $LH_i$ ) para o teste de interferências, e as coordenadas precisas dos vértices de controle. As obstruções foram divididas em três níveis: baixa obstrução (NB), média obstrução (NM) e alta obstrução (NA). Em caso da diferença do posicionamento planimétrico ser menor que 2 metros, o receptor Hemisphere A21 é aceito para levantamentos batimétricos.

Os vértices foram classificados por nível alto de obstrução (V14, V17, V21 e V25), nível médio (V22, V24, V67 e V71) e nível baixo (V23, V28 e V29), de acordo com as barreiras físicas (como vegetação e edificações) existentes no entorno de cada ponto. As acurácias planimétricas foram calculadas a partir dos vetores das componentes N e E, determinadas pelo método de transformação de coordenadas topocêntrica local, dos respectivos conjunto de dados.

### 5.1.3 Análise das coordenadas planimétricas do levantamento

A literatura indica que pelo menos cinco satélites devem ser observados simultaneamente. O parâmetro de qualidade pode ser verificado pelos valores de DOP (*Dilution Of Precision*), onde um bom levantamento possui valores menor ou igual a seis (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; HEGARTY, 2017). Portanto, foram analisados os parâmetros de qualidade do posicionamento planimétrico como número de satélites observados, diluição da precisão horizontal (HDOP) e elevação dos satélites.

Devido a indisponibilidade de acesso ao arquivo RINEX do GPS Hemisphere A21 que contém a elevação dos satélites, utilizou-se a plataforma online da Trimble<sup>1</sup>, onde as coordenadas plani-altimétrica da região de interesse devem ser inseridas para análise dos parâmetros de qualidade do posicionamento. Os pontos que não atenderam o número mínimo de 5 satélites observados e HDOP maiores que 6 foram excluídos das análises.

Antes de prosseguir com a diferenciação entre as coordenadas medidas e precisas, as coordenadas geodésicas geocêntricas em WGS-84 (em grau, minuto, segundo) foram transformadas para um sistema de coordenadas topocêntricas local<sup>2</sup>. Esse sistema facilita a análise pois proporcionam as coordenadas em unidade métrica, sendo possível calcular o vetor das discrepâncias em N, E e up. Adicionalmente, minimizam os erros de deformação propagados ao utilizar projeções como UTM (Universal Transversa de Mercator).

A partir da aplicação do cálculo das diferenças das coordenadas obtidas pelo GPS Hemisphere e as coordenadas geodésicas precisas dos pontos, considerada como referência, foram determinadas as discrepâncias. Os resultados obtidos pelo GPS Hemisphere RTK em relação às coordenadas precisas foram nas componentes Este ( $\Delta E_j$ ), Norte ( $\Delta N_j$ ) e planimétrica ( $D_{plan,j}$ ) apresentadas nas equações (5.1), (5.2) e (5.4), respectivamente.

$$\Delta E_j = E_{k,j} - E_{pos,j} \quad (5.1)$$

$$\Delta N_j = N_{k,j} - N_{pos,j} \quad (5.2)$$

$$\Delta up_j = up_{k,j} - up_{pos,j} \quad (5.3)$$

Onde:

Índice j indica a época GPS e k é o método que será analisado;

$\Delta E_j$ ;  $\Delta N_j$ ;  $up_j$ : Discrepância entre as componentes Este, Norte e altitude, respectivamente, dos métodos RTK e MPRE (metros);

$E_{k,j}$ ;  $N_{k,j}$ ;  $up_{k,j}$ : Componentes Este, Norte e altitude, respectivamente, obtidas pelo método

<sup>1</sup> <https://www.gnssplanning.com/>

<sup>2</sup> para acesso às equações de transformação consultar Seeber (2003, p. 22)



a ser analisado (metros); e

$E_{pos,j}$ ;  $N_{pos,j}$ ;  $up_{pos,j}$ : Componentes Este e Norte, respectivamente, das coordenadas de referência (metros).

$$D_{plan,j} = \sqrt{\Delta E_j^2 + \Delta N_j^2} \quad (5.4)$$

Posteriormente foi calculado, de acordo com o manual da NSDI (*National Spatial Data Infrastructure*) (Federal Geographical Data Committee, 1998), a raiz do erro médio quadrático ( $RMSE_i$ ) nas componentes  $E$ ,  $N$  e  $up$ , para os GPS Leica e Hemisphere, apresentado pela equação (5.5); e a acurácia planimétrica ( $RMSE_{plan}$ ), conforme a equação (5.6).

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum (i_{k,j} - i_{pos,j})^2}{n}} \quad (5.5)$$

Onde  $i$  é o índice que varia nas componentes das direções  $E$ ,  $N$  e  $up$ ;  $j$  é a época GPS;  $k$  é o método analisado e  $n$  é o número total de observações.

$$RMSE_{plan} = \sqrt{RMSE_E^2 + RMSE_N^2} \quad (5.6)$$

$$RMSE_{3D} = \sqrt{RMSE_E^2 + RMSE_N^2 + RMSE_{up}^2} \quad (5.7)$$

Mediante a aplicação dessas equações foram realizadas análises quanto a qualidade planimétrica do posicionamento da embarcação.

## 5.2 AVALIAÇÃO DO PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER

Foram realizadas medições estáticas e cinemáticas (figura 17) em ambiente controlado para checagem da consistência dos dados de profundidade e desenvolvimento das etapas de processamento dos dados de profundidade. O levantamento estático teve o objetivo de verificar o comportamento do ADCP em função de possíveis interferências, nos sinais acústicos, geradas pelo entorno da área medida e devido a operação de outros sensores acústicos simultaneamente. Em relação ao teste cinemático, este foi realizado com intuito de espacializar os dados para identificar os *outliers* e filtrar dados espúrios, selecionando somente informações consistentes e relevantes para análise da batimetria. Posteriormente aos testes na área de controle, as etapas foram aplicadas em um ambiente natural para análise dos resultados dos dados processados.

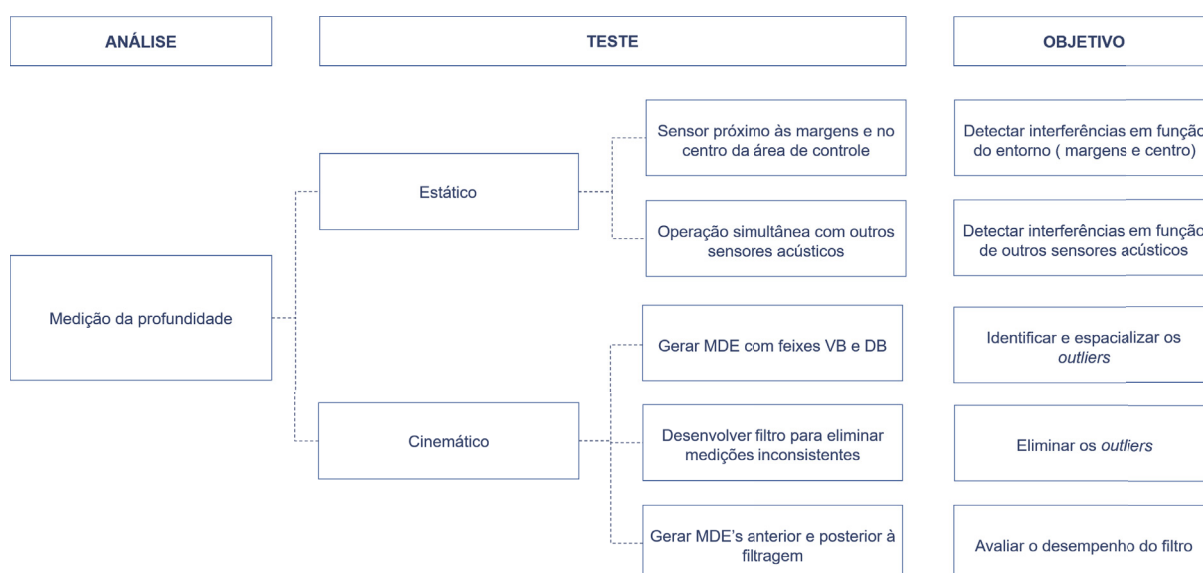


Figura 17 – Organograma dos testes para avaliação dos produtos batimétricos obtidos pelo ADCP e seus respectivos objetivos.

### 5.2.1 Testes em área de controle

As medições foram realizadas com o intuito de verificar o comportamento do ADCP em um ambiente de profundidade conhecida. Nesse sentido, foram efetuados testes em uma piscina com medidas 7,43 m de comprimento, 3,52 m de largura e profundidades variando entre 1,282 m e 1,216 m, como ilustrado na Figura 18.

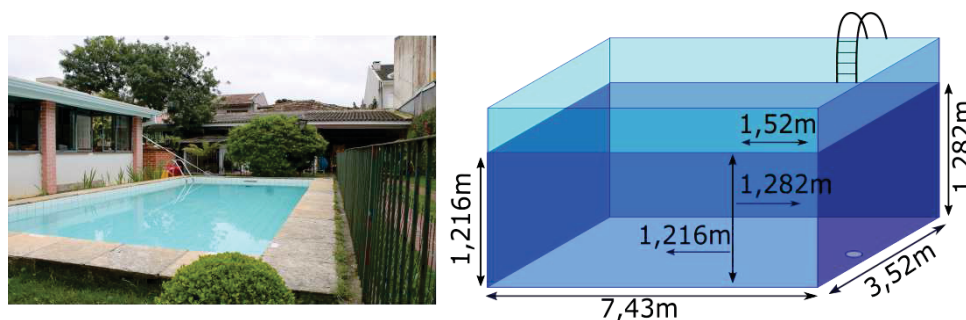


Figura 18 – À esquerda: foto da piscina onde foram realizados os testes. À direita: croqui da piscina onde foram efetuadas as medições de profundidade.

Para melhor delimitação planimétrica da área de teste foi instalado um receptor GPS modelo HIPER SR, do fabricante Topcon Corporation, nos vértices da piscina durante um período de aproximadamente 20 min. Os dados foram processados posteriormente com a estação UFPR da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Para aplicação do método RTK foi necessário a implantação de um ponto próximo à área de controle denominado de CP01 de coordenadas no sistema de referência WGS-84  $25^{\circ} 25' 28,94057''S$ ,  $49^{\circ} 15' 01,44291''W$  e altitude elipsoidal de 897,910 m, o qual foi ocupado por aproximadamente 1h e processado pelo método de posicionamento relativo estático em relação à estação UFPR da RBMC. A estação de referência foi instalada em cima da casa de máquinas. Esse local foi escolhido por ser um lugar alto que contribuiu para a minimização da degradação do sinal devido a presença de obstruções no entorno que poderia acarretar em um menor número de satélites observados, degradando a acurácia das correções diferenciais que estariam sendo enviadas para a estação rover (Figura 19).



Figura 19 – Estação de referência instalada no ponto CP01 para os testes em ambiente controlado.

Foram realizados testes estático (ET) e cinemático (CT) operando os sensores isoladamente e simultaneamente. Antes da coleta de dados o ADCP foi calibrado e os *offsets* como draft e altura da antena, foram medidos e inseridos na configuração dos

respectivos equipamentos (Figura 20). O ADCP requer a declinação magnética para correção da bússola, utilizada na determinação da direção de movimentação do sensor acústico. Para região da área de controle, o valor foi de  $-19,66^\circ$ , determinado a partir da ferramenta online da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)<sup>3</sup>. O CTD *CastAway* foi utilizado para medições dos perfis de propagação do som na água, empregadas nas correções das profundidades. Devido as baixas profundidades e por se tratar de uma coluna d'água sem estratificação foram usadas as velocidades médias.

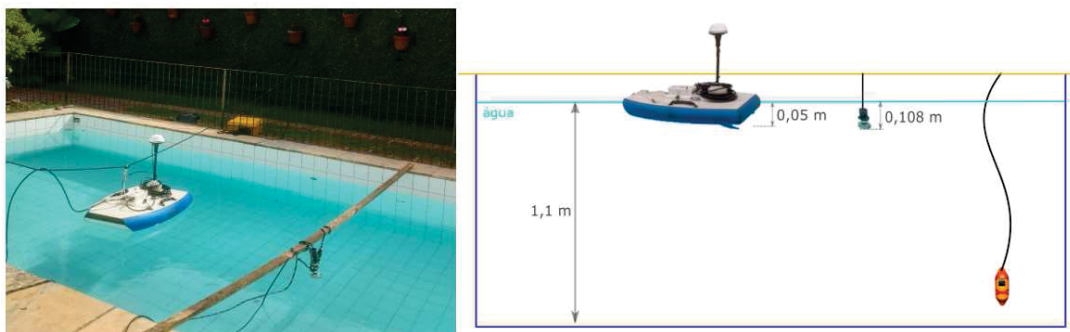


Figura 20 – *Offsets* usados na configuração do ADCP M9 e ecobatímetro monofeixe SDH-13A para os testes.

Por se tratar de uma área com superfície regular e declividade gradual, onze pontos ao longo da área de controle foram medidos com um bastão graduado e um GPS Leica 1200 operando em modo RTK, para servir de valores de referência, tanto para os testes estáticos quanto para os cinemáticos. Em cada ponto foram coletados 10 épocas GPS e calculada a média para determinar as coordenadas associadas a cada profundidade, onde os pontos foram interpolados usando o método IDW, gerando um modelo de elevação de controle.

### 5.2.1.1 Teste estático

O teste estático, como mostrado no organograma na Figura 17, objetivou verificar o comportamento do perfilador acústico de efeito Doppler quanto a possíveis interferências do entorno e em função de outros sensores acústicos (Figura 21). Nos testes ET1 e ET2 o ADCP operou isoladamente e no ET3 e ET4 simultaneamente aos ecobatímetros monofeixe. Dessa forma, optou-se por comparar as profundidades dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) com as medições manuais obtidas com a haste graduada para identificar possíveis interferências devido a presença de outro sensor acústico.

Os testes estáticos foram divididos em:

- ET1 - Sensor estático às margens da área de controle;
- ET2 - Sensor estático no centro da área de controle;

<sup>3</sup> <https://ngdc.noaa.gov/geomag-web/>

- ET3 - Sensor estático às margens da área de controle operando simultaneamente com ecobatímetro SDE-28S da empresa *Teledyne Odom Hydrographic*;
- ET4 - Sensor estático às margens da área de controle operando simultaneamente com ecobatímetro SDH-13A da empresa *South Surveying & Mapping Technology*;



Figura 21 – Organograma dos testes realizados em ambiente controlado.  $VB$  é o feixe vertical do ADCP;  $DB$  são os feixes Doppler do ADCP;  $ROD_i$  é a medida manual com a haste graduada;  $RVB_i$  e  $RDB_i$  são as diferenças entre o ADCP ( $VB$  e  $DB$ ) e  $ROD$ ;  $SB1VB_i$ ,  $SB1DB_i$ ,  $SB2VB_i$  e  $SB2DB_i$  são as diferenças entre o ADCP ( $VB$  e  $DB$ ) e  $ROD$  com a presença dos ecobatímetros monofeixes South SDE-28S ( $SB1$ ) e Odom SDH-13A ( $SB2$ ); onde  $i$  é o número de medições.

Para cada teste as profundidades obtidas com ADCP ( $VB$  e  $DB$ ) foram comparadas com as medições manuais, calculando assim o erro absoluto de cada medição. A partir do erro absoluto foi determinada a acurácia usando o cálculo do erro médio quadrático (RMSE). A precisão foi obtida a partir do desvio padrão de cada conjunto de dados.

### 5.2.1.2 Teste cinemático

No teste cinemático (Figura 17) foram gerados MDE's com os feixes  $VB$  e  $DB$  do ADCP para identificar e espacializar possíveis *outliers* no conjunto de dados. Na sequência foi desenvolvido um método para eliminar essas inconsistências e ajustar os dados para obter informações mais próximas da realidade (seção 5.2.1.3).

Medidas com SBES (SDE-28S) e ADCP foram executadas, onde uma suavização a partir de um método robusto de regressão local (descrito na seção 5.2.1.3) foi aplicada para eliminar os *outliers*, e seus respectivos MDE's foram gerados utilizando o interpolador

IDW. O modelo criado com SBES foi comparado com o modelo das medições manuais (referência) para sua validação.

O teste cinemático foi dividido em (Figura 22):

- CT1 - Sensor em movimento descrevendo trajetórias em perfis longitudinais;
- CT2 - Sensor em movimento descrevendo trajetórias em perfis transversais;
- CT3 - Sensor em movimento descrevendo trajetórias em zig-zag; e
- CT4 - Sensor em movimento descrevendo trajetórias pelas margens da área de controle.

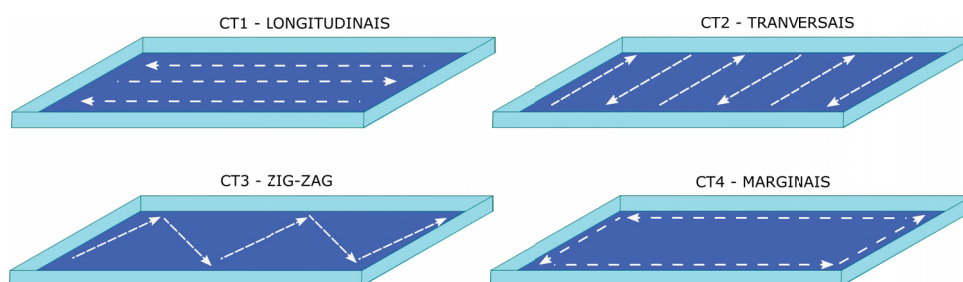


Figura 22 – Trajetórias realizadas nos testes cinemáticos.

A comparação dos dados SBES em relação às medições manuais foi necessária para identificar erros sistemáticos do equipamento (seção 6.2.2.1). A validação do SBES, permite que este seja usado como referência para o ajustamento dos dados do ADCP, já que é o método clássico indicado nas especificações técnicas para levantamentos batimétricos. O Modelo Digital de Elevação dos dados de profundidade do SBES foram comparados com o modelo das medições manuais (ROD), usando os resíduos como parâmetro de qualidade. Ciente que os resíduos não poderiam ultrapassar o erro da profundidade permitido pela ANA (2013) de 0,20 m e da IHO (2020) pelo cálculo da equação da incerteza vertical total (TVU) da Ordem especial.

Posteriormente essa mesma comparação foi realizada entre as profundidades obtidas com o ADCP e as medições de referências ROD (seção 6.2.2.2) e SBES (seção 6.2.2.3). Os resíduos entre os modelos ADCP e o modelo de referência (ROD e SBES) foram gerados e usados para classificação de "aceito" (resíduos < ANA/IHO) e "rejeitado" (resíduos > ANA/IHO), indicando um erro maior que o permitido de 0,20 m pela ANA (2013) e da incerteza vertical total (TVU) para Ordem Especial da IHO (2020).

Em caso de rejeição, uma filtragem foi realizada na tentativa de melhorar a qualidade dos dados do ADCP, seja para o VB quanto para os DBs (seção 5.2.1.3). Uma suavização pelo método robusto de regressão local, o qual leva em consideração o desvio mediano absoluto (MAD) evitando possíveis contaminações de valores espúrios. Um novo MDE com os dados suavizados foram gerados e calculados os resíduos entre os modelos ADCP e o modelo referência (ROD e SBES) e comparados com o erro permitido.

Para verificar se a distribuição do conjunto ADCP provém do mesmo conjunto do



SBES, o teste de Wilcoxon foi aplicado para o feixe vertical onde  $H_0 : VB = referência$  (ROD e SBES) e para os feixes Doppler,  $H_1 : VB \neq referência$  (ROD e SBES) e  $H_0 : DB = referência$  (ROD e SBES) e  $H_1 : DB \neq referência$  (ROD e SBES).

Para os conjuntos de dados rejeitados, uma regressão linear foi realizada para cada levantamento, onde equações para o VB e DBs foram determinadas a partir das profundidades de referência (ROD e SBES), e aplicadas para o ajuste dos dados do ADCP. Novamente foi calculado os resíduos entre o MDE ajustados e os dados de referência, realizado o teste de hipótese para verificar a similaridade de distribuição dos dados ajustados em relação aos dados de referência, e verificado o erro obtido com os erros permitidos pelas normas vigentes.

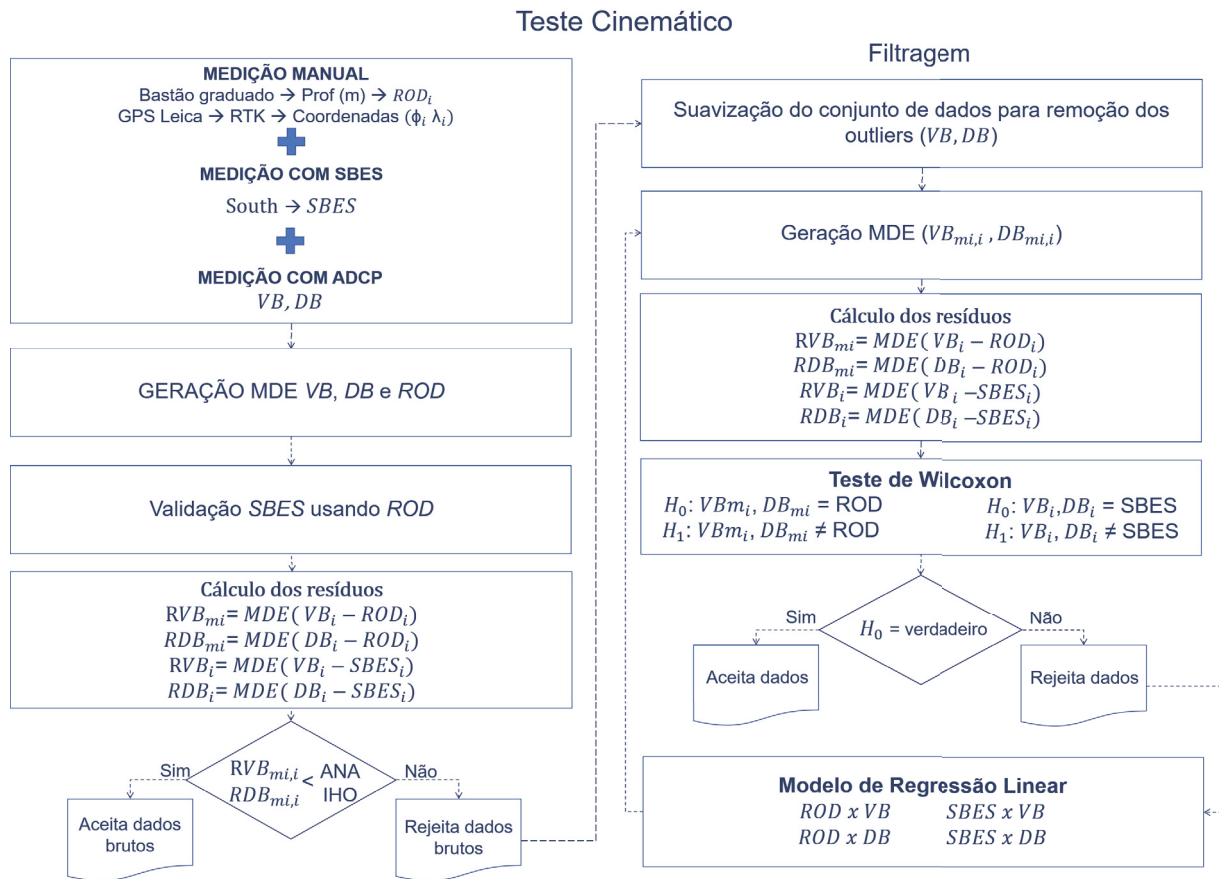


Figura 23 – Organograma do teste cinemático realizado em ambiente controlado. Onde VB é o feixe vertical e DB é o feixe Doppler do ADCP, RVB e RDB são os resíduos do MDE do ADCP em relação às medições realizadas SBES.  $VB_{mi,i}$  e  $DB_{mi,i}$  são as profundidades filtradas usando o as medições manuais (ROD) e o ecobatímetro monofeixe (SBES).

### 5.2.1.3 Filtragem dos dados de profundidade

A primeira etapa foi eliminar os *outliers* dos dados brutos do SBES e ADCP utilizando o método robusto de regressão local (equação 5.8), o qual atribui pesos mais baixos para os valores considerados *outliers* na regressão. De acordo com Buzzi-Ferraris e Manenti (2011), Leys et al. (2013) e Bae e Ji (2019), usar o desvio mediano absoluto (MAD) ao invés da média evita a contaminação e falsos valores no conjunto dos dados. Os resultados positivos obtidos com a aplicação do valor mediano ao invés da média nos trabalhos de Furnans e Austin (2008) e Sambuelli e Bava (2012) fortalecem a afirmação anterior.

O método aplicado nesta pesquisa calcula a diferença entre o valor resposta ( $y$ ) e o valor predito ( $\hat{y}$ ) (equação 5.9). Os pesos robustos são computados por uma função biquadrada para cada ponto do intervalo. Para peso ( $w_i$ ) igual a zero, indica que o resíduo está fora de seis vezes o desvio mediano absoluto, como indicado por Dalmolin (2010) e Montgomery e Runger (2013). Posteriormente, os pontos fora desse intervalo foram excluídos da suavização.

$$w_i = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{r_i}{6MAD}\right)^2\right)^2, & |r_i| < 6MAD \\ 0, & |r_i| \geq 6MAD \end{cases} \quad (5.8)$$

Onde  $r$  é o resíduo produzido pelo procedimento de regressão e suavização (equação 5.9) e  $i$  é o  $i$ -ésimo ponto; e MAD (desvio absoluto mediano) é igual à mediana dos desvios absolutos dos dados em relação à mediana (equação 5.10).

$$r_i = y_i - \hat{y} \quad (5.9)$$

$$MAD = \text{median}(r_i) \quad (5.10)$$

Um Modelo Digital de Elevação (MDE) foi gerado, a partir do conjunto de dados livre de *outliers*, usando o método de interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW) para estimar valores para áreas não medidas. O IDW considera que pesos são atribuídos pontualmente, assumindo que maior será a probabilidade do comportamento ser igual ao fenômeno em questão nos pontos mais próximos do evento do que aqueles mais distantes (equação 2.8 - seção 2.3).

O dados do SBES foram usados como referência para o cálculo dos resíduos ( $R_i$ ) do ADCP (feixes vertical e Doppler) como exposto na equação 5.11. Foi obtida a diferença entre as profundidades do ADCP ( $ADCP_i$ ) e SBES ( $SBES_i$ ) nas mesmas coordenadas em  $N$  e  $E$ . As profundidades do SBES e ADCP foram usadas na determinação do modelo



de regressão linear para cada cenário, com o objetivo de ajustar o conjunto de dados do ADCP em vista que os resíduos apresentaram uma média ( $\mu$ ) diferente de zero.

$$R_i = ADCP_i - SBES_i \quad (5.11)$$

As equações foram aplicadas para melhorar a qualidade dos dados obtidos com o ADCP, que subestimou as profundidades quando comparadas com as medições manuais na área de controle. Afim de verificar se as medições do ADCP e SBES possuem a mesma distribuição, o teste de Wilcoxon a um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Inicialmente, os testes estatísticos foram aplicados empregando os dados brutos de profundidade para verificar diferenças entre o conjunto medido e o de referência. No caso dos resultados apresentarem diferenças significativas, a etapa seguinte foi introduzida, e assim sucessivamente até que a etapa de ajustamento fosse concluída. Ao final do pós-processamento a hipótese  $H_0$  foi aceita para confirmar o progresso da sistematização do processamento de dados de profundidade providas do ADCP.

### 5.2.2 Estudo de caso Reservatório Passaúna

O reservatório Passaúna está localizado entre os paralelos 25° 15'S - 25° 35' S e meridianos 49° 25'W - 49°20' W. Com a finalidade de abastecimento de água, distribui água para a cidade de Curitiba e região metropolitana, com uma população de aproximadamente 2 milhões. Diversos estudos têm sido conduzidos nessa região no que concerne qualificação e quantificação de sedimentos (HILGERT; SOTIRI; FUCHS, 2019; HILGERT et al., 2019), indicadores ambientais (Mattar Neto; KRÜGER; DZIEDZIC, 2009) e emissão de gases (MARCON et al., 2019; HILGERT et al., 2019). A região a montante da barragem do reservatório Passaúna, também denominado de *buffer* ou pré-reservatório (Figura 24), possui grande influência nos processos que acontecem ao longo do reservatório. No entanto, devido às dificuldades de se realizar medições em épocas de seca quando as profundidades são extremamente baixas, esta região ainda é uma potencial área a ser investigada. O objetivo foi verificar os resultados do ADCP em uma situação real e comparar com um levantamento em uma mesma época usando um SBES, para identificar os possíveis erros gerados no levantamento e tentar minimizá-los em futuras campanhas.

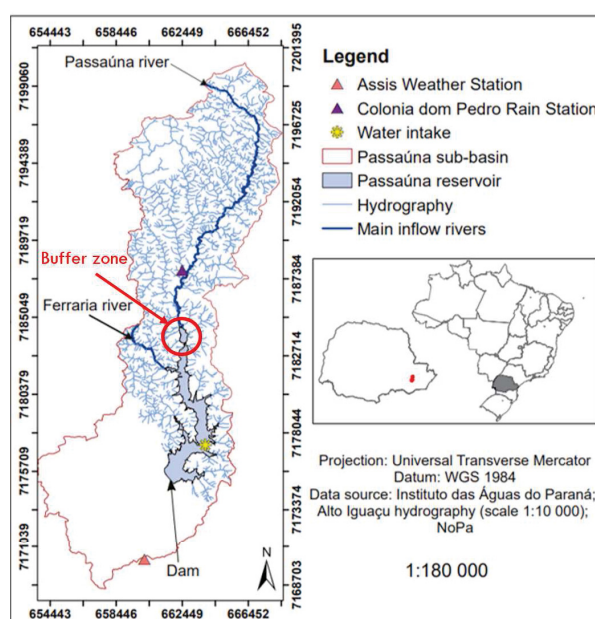


Figura 24 – Localização do reservatório Passaúna, indicando a região do buffer dentro da área circutada.

Fonte: Adaptado de Marcon (2018).

O levantamento batimétrico foi executado na região do textitbuffer, a montante da barragem do reservatório Passaúna (Figura 16). A coleta de dados foi realizada com o conjunto M9 da SonTek instalado em uma embarcação, no qual seguiu o planejamento das linhas de sondagem a cada 15 metros e linhas verificação a cada 30 metros (Figura 25). Posteriormente, o mesmo planejamento de linhas foi usado para realizar o levantamento com SBES, onde as coordenadas foram obtidas pelo GPS WS3910 operando em modo

absoluto. A leitura da régua limnimétrica foi feita durante o levantamento batimétrico, localizada na ponte Ferrara às margens da região do *buffer*. Os valores lidos em campo foram usados na correção das profundidades medidas com os sensores acústicos.

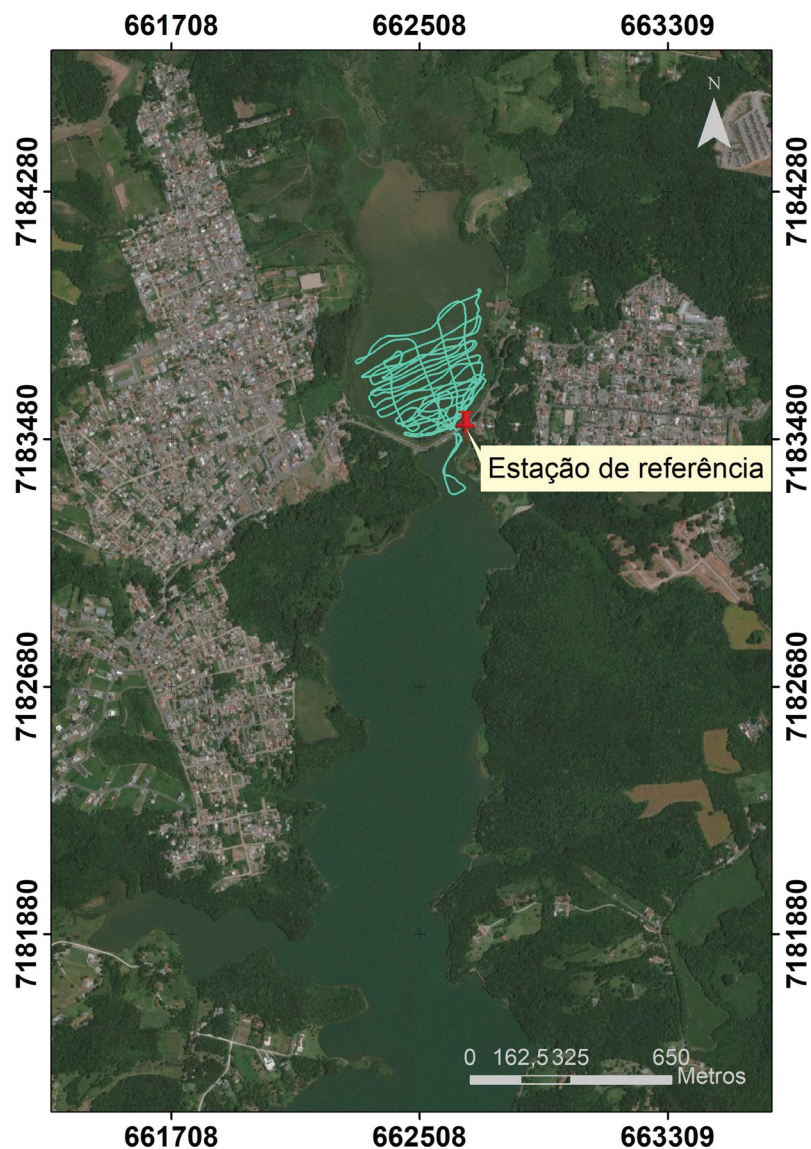


Figura 25 – Linhas de sondagem navegadas durante a aquisição de dados, processo que foi administrado pelo *software HydroSurveyor*.

O pós-processamento envolveu a suavização, o ajustamento em relação ao SBES, geração do MDE e análise estatística (Figura 26), seguindo as etapas de filtragem dos dados de profundidade (seção 5.2.1.3). As profundidades obtidas com o SBES foram usadas como referência para o ajustamento dos dados do ADCP, e no cálculo dos resíduos dos MDE's das profundidades do ADCP (bruta, suavizada e ajustada). Os resultados foram avaliados a partir das especificações técnicas da ANA (2013) e IHO (2020).

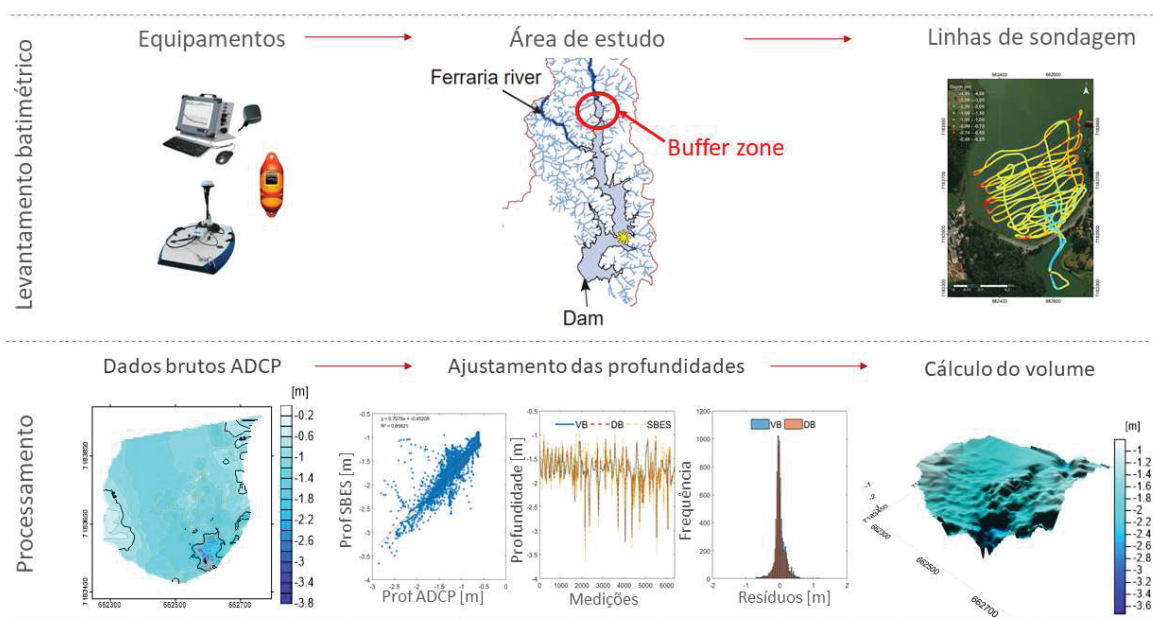


Figura 26 – Resumo da sequência do levantamento e processamento na região do *buffer* no reservatório Passaúna.



### 5.2.3 Aplicação Rio Taquari

O rio Taquari possui cerca de 80 Km, inserido na bacia do Taquari, percorrendo os estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul até desaguar no Rio Paraguai. A área de estudo está localizada entre os paralelos  $18^{\circ}31'28''$  S e  $18^{\circ}31'43''$  S e meridianos  $54^{\circ}43'$  W e  $54^{\circ}44'$  W. Segundo Galdino, Vieira e Pellegrin (2006), próximo à cidade de Coxim existe uma rede de drenagem com alto poder de erosão e transporte de sedimento, tornando essa região altamente dinâmica. Uma vez observada essa rápida variação, o objetivo da campanha foi detectar a movimentação diária das estruturas de fundo e calcular o transporte de sedimento na região.

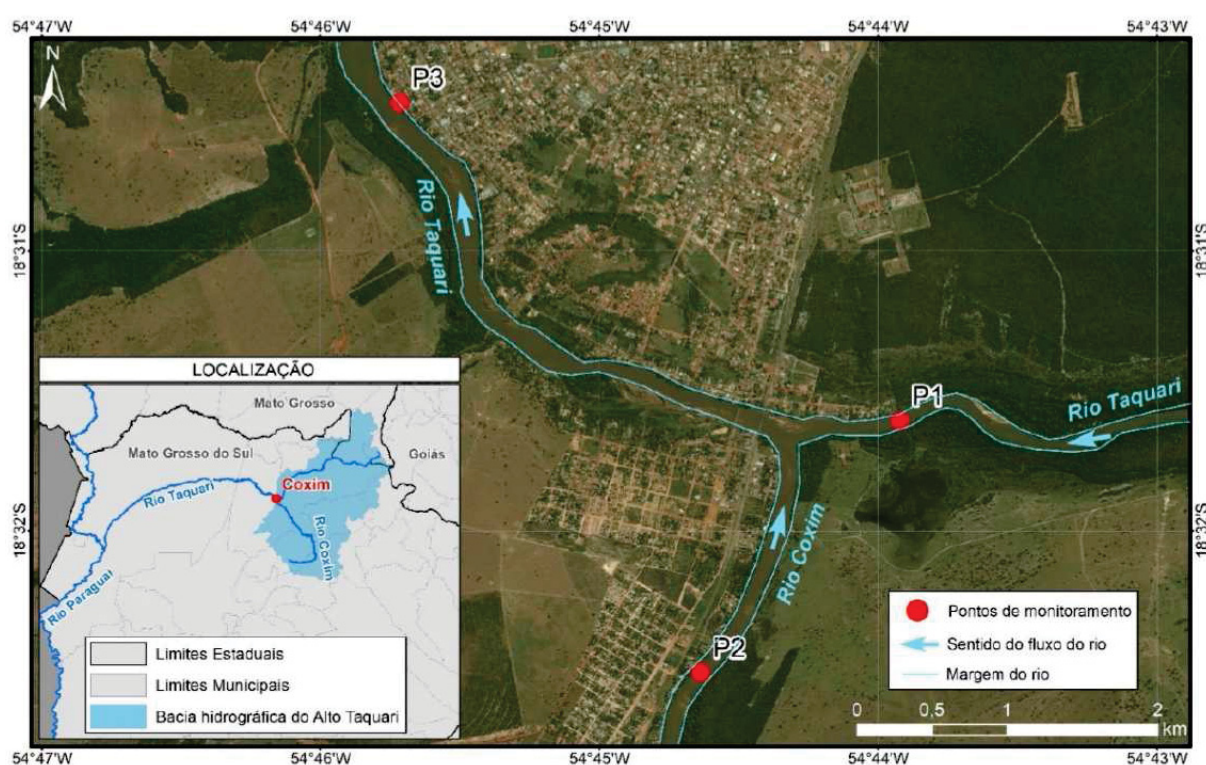


Figura 27 – Localização do rio Taquari, cidade de Coxim, MS.

Fonte: Ratton (2020)

Em parceria com Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) foram realizados levantamentos com ADCP's, com a finalidade de estudos sobre a morfologia do fundo submerso, medição de velocidades ao longo do rio, cálculo de vazão, sedimento em suspensão e de fundo.

Para esta pesquisa o ADCP e GPS Leica foram instalados em uma embarcação de pequeno porte, onde os *offsets* foram medidos e inseridos no *software HydroSurveyor* para coleta e armazenamento dos dados. A estação de referência foi instalada em um ponto de coordenadas conhecidas (latitude  $-18^{\circ} 31' 34,5685''$ , longitude  $-54^{\circ} 43' 57,2227''$  e altitude elipsoidal de 198,75 metros no Sistema de Referência WGS-84) próximo as margens do rio Taquari como observado na Figura 28. Em paralelo ao levantamento batimétrico foram

realizadas coletas de sedimento (fundo e suspensão), visando medição de vazão e do fundo móvel. Considerando a alta dinâmica do rio Taquari, a mesma trajetória foi percorrida em dois levantamentos consecutivos para comparação dos MDE's.

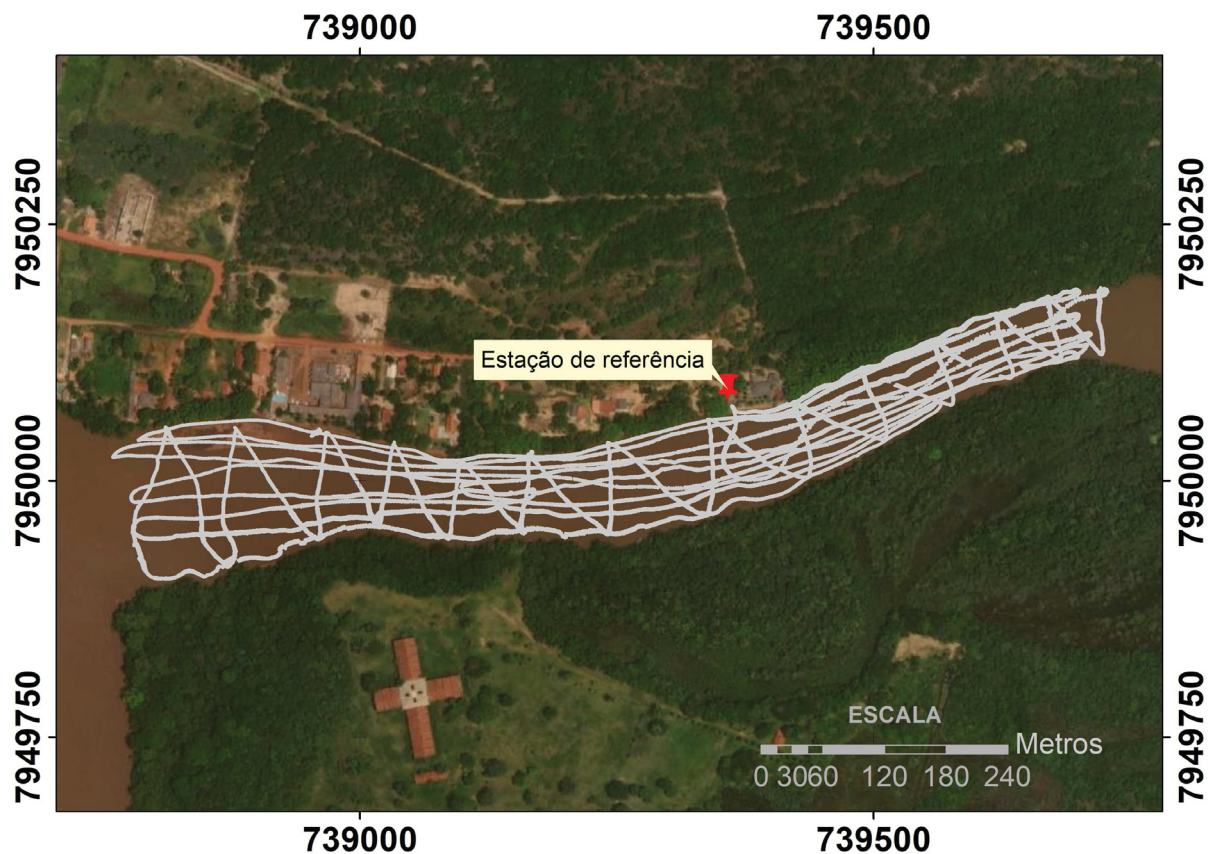


Figura 28 – Localização da estação de referência e linhas de pesquisa executadas com o ADCP operado pelo *software HydroSurveyor*.

O pós-processamento consistiu na correção do nível d'água a partir das leituras de uma régua limnimétrica instalada na região, seguida pela suavização dos dados para eliminação dos *outliers* e na aplicação das equações obtidas no reservatório Passaúna para o ajustamento dos dados devido a impossibilidade de realizar o levantamento batimétrico com um SBES. Pela falta de um conjunto de profundidades de referência (SBES) a análise estatística não foi realizada para essa região.

Foi possível a análise quanto as diferenças entre os MDE's dos dois dias de levantamentos, em que foram detectadas as áreas de erosão e deposição. Os resultados foram confrontadas com o estudo de Ratton (2020), que usou os mesmo dados brutos na detecção de formas de leito. Esse estudo de caso teve como objetivo mostrar as diversas aplicações do ADCP e a importância do processamento dos dados de profundidade.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os resultados dos testes com o conjunto M9 da Sontek, o qual foi subdividido em análises do posicionamento planimétrico a partir de testes com GPS (seção 6.1) e da medição de profundidades a partir de testes com sensores acústicos (ADCP e SBES) (seção 6.2). O objetivo foi verificar o desempenho do conjunto M9 aplicado para levantamentos batimétricos. Os resultados foram comparados com os valores de referência de acordo com as especificações técnicas da Agência Nacional de Águas e Organização Internacional de Hidrografia.

### 6.1 TESTES GPS HEMISPHERE

Nesta seção serão apresentados os resultados da precisão e acurácia dos testes estático e cinemático realizados com o GPS A21 da Hemisphere operando em modo RTK, em que a estação de referência, alocada no marco RM03, enviou as correções diferenciais via rádio (Figura 13). Os levantamentos e análises dos dados foram divididos em estático e cinemático, e subdivididos em 2 tipos testes: GPS Hemisphere operando isoladamente com variação da altura da antena em 1,5 m (H1) e 2,0 metros (H2); e GPS Leica operando simultaneamente com Hemisphere - variando a altura da antena do Hemisphere em 1,5 m (LH1) e 2,0 m (LH2) conforme exposto nas seções 5.1.1 e 5.1.2.

#### 6.1.1 Teste estático

As discrepâncias das coordenadas obtidas nos levantamentos estáticos em relação às coordenadas de referência do marco geodésico RM01 variaram entre o milímetro e o décimo do centímetro para a planimetria, e em metros para altimetria. Observa-se na figura 29, que ocorreram oscilações nas discrepâncias ao longo do tempo para todos os testes.

No entanto, os testes com altura da antena de 1,5 metros (Estático H1 e Estático LH1), apresentaram variações com uma amplitude menor do que aquelas obtidas com altura da antena de 2 metros (Estático H2 e Estático LH2). Estes testes proporcionaram as maiores discrepâncias, com valor máximo de 72 centímetros para planimetria no fim do rastreamento do teste Estático H2. Este fato ocorreu devido a baixa carga da bateria que alimentava o GPS, provocando um aumento da discrepância ao final do teste H2 desencadeando uma discrepância em longitude de 56 centímetros (Tabela 6).

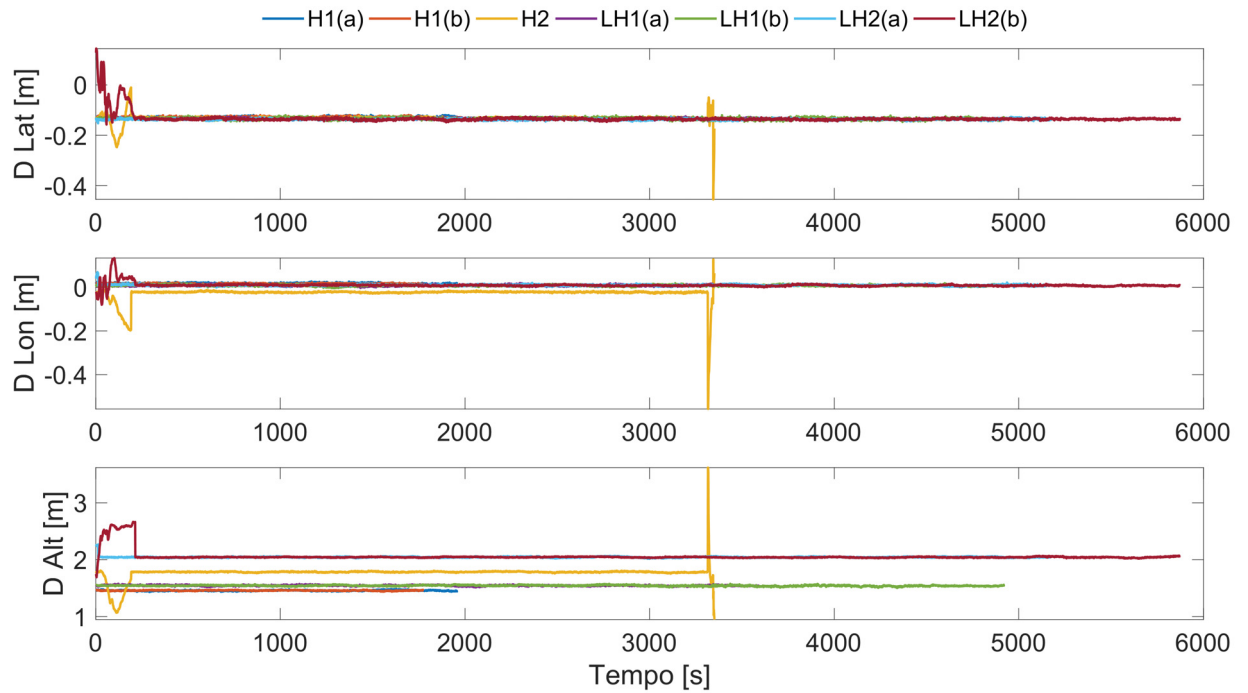


Figura 29 – Discrepâncias em metros das coordenadas em latitude (D Lat), longitude (D Lon) e altitude (D Alt) do levantamento com GPS Hemisphere em relação às coordenadas precisas do marco RM01. Cada cor representa um teste realizado, onde H são os teste com a antena Hemisphere operando isoladamente e LH são os testes operando simultaneamente a outra antena.

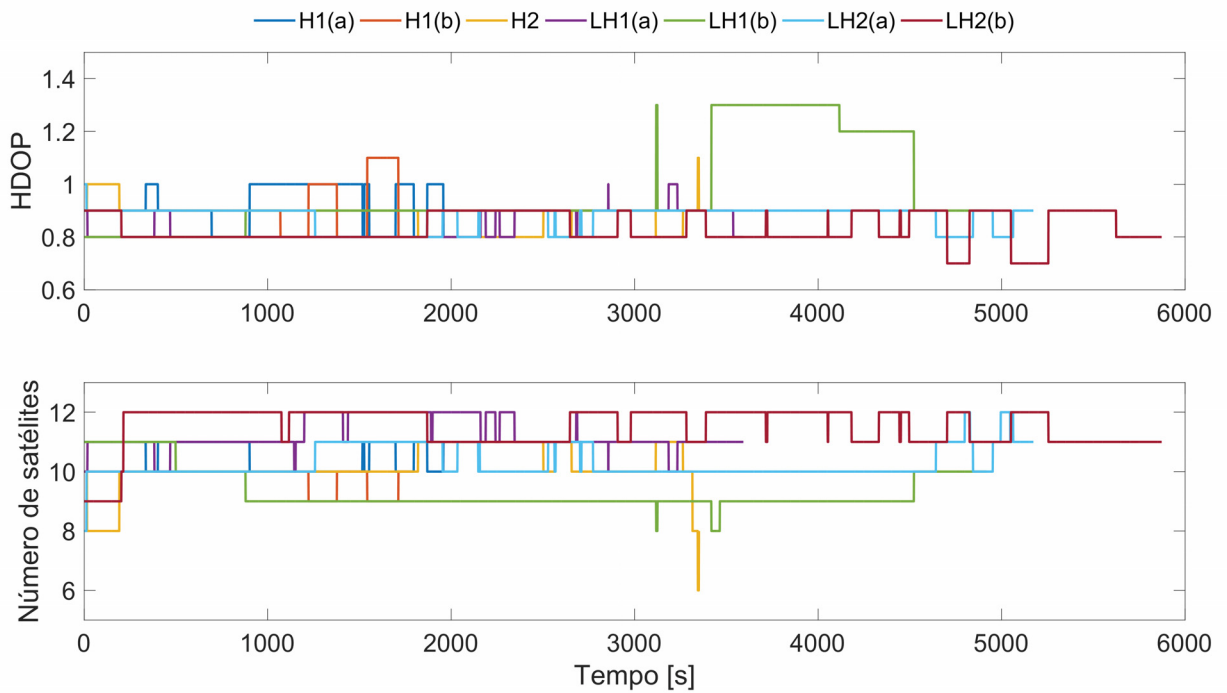


Figura 30 – Gráfico dos valores de HDOP e número de satélites durante os levantamentos estáticos com GPS Hemisphere. Cada cor representa um teste realizado, onde H são os teste com a antena Hemisphere operando isoladamente e LH são os testes operando simultaneamente a outra antena.



Ao analisar os parâmetros de qualidade na Figura 30, o número de satélites observados simultaneamente se encontra entre 6 e 12 e o valor de HDOP não ultrapassou 1,3 (Tabela 6) durante todo o levantamento. Esses parâmetros estão de acordo com as especificações técnicas para posicionamento planimétrico a partir do método RTK do INCRA (2013), ANA (2013) e IHO (2008).

Tabela 6 – Valores das discrepâncias entre as coordenadas obtidas pelo método RTK e as coordenadas precisas do ponto, número de satélites observados e valores de HDOP.

	D Lat (m)		D Lon (m)		D Alt (m)		Nsat		HDOP	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
<b>H1 (a)</b>	0,119	0,141	0,007	0,027	1,43	1,49	10	11	0,8	1,0
<b>H1 (b)</b>	0,119	0,140	0,008	0,023	1,44	1,48	9	10	0,8	1,1
<b>H2</b>	0,010	0,454	0,001	0,557	0,95	3,62	6	11	0,8	1,1
<b>LH1 (a)</b>	0,125	0,144	1E-04	0,020	1,51	1,58	10	12	0,8	1,0
<b>LH1 (b)</b>	0,120	0,147	3E-05	0,019	1,50	1,58	8	11	0,8	1,3
<b>LH2 (a)</b>	0,126	0,152	1E-04	0,070	2,02	2,27	8	12	0,8	1,0
<b>LH2 (b)</b>	8E-05	0,157	5E-05	0,134	1,69	2,66	9	12	0,7	0,9

Apesar de inconsistências no teste H2, os desvios padrão planimétricos dos testes variaram entre 0,003 m e 0,04 m. Já as discrepâncias planimétricas em relação ao ponto de coordenadas precisas (RM01) apresentaram valores menores que 0,16 m, exceto para o teste H2. A raiz do erro médio quadrático (RMSE) variou entre 0,004 m e 0,03 m para a planimetria ( $RMSE_{2D}$ ), e entre 0,007 m e 0,12 m considerando a componente vertical ( $RMSE_{3D}$ ) (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores do erro médio quadrático em latitude ( $RMSE_E$ ), longitude ( $RMSE_N$ ) e altitude ( $RMSE_{up}$ ) .

	$RMSE_E$	$RMSE_N$	$RMSE_{up}$	$RMSE_{2D}$	$RMSE_{3D}$
<b>H1 (a)</b>	0,0036	0,0030	0,0085	0,0047	0,0097
<b>H1 (b)</b>	0,0032	0,0023	0,0059	0,0040	0,0071
<b>H2</b>	0,0176	0,0321	0,1183	0,0366	0,1238
<b>LH1 (a)</b>	0,0027	0,0029	0,0093	0,0040	0,0101
<b>LH1 (b)</b>	0,0039	0,0031	0,0097	0,0050	0,0109
<b>LH2 (a)</b>	0,0027	0,0038	0,0122	0,0047	0,0131
<b>LH2 (b)</b>	0,0209	0,0106	0,0917	0,0234	0,0946

Mediante os valores citados por INCRA (2010) e Hegarty (2017) referente aos parâmetros definidores da qualidade do posicionamento (onde de acordo com as especificações técnica do INCRA (2013) o método RTK demanda um número mínimo de cinco satélites observados simultaneamente e valor HDOP menor que 6) e das acurácias da planimetria com valores menor que 10 cm (Tabela 7), conclui-se que os resultados utilizando o posicionamento RTK em um mesmo ponto foram satisfatórios.

Considerando o pior cenário, a acurácia do equipamento foi de 0,04 m para planimetria e 0,12 m para plani-altimetria. Apesar da degradação da qualidade do posicionamento no teste H2 e LH2, considerou-se todos os testes, pois dificilmente as condições serão ideais durante todo o levantamento.

### 6.1.2 Testes cinemático

Nesta etapa foram ocupados 11 vértices, durante um período de aproximadamente 15 minutos, localizados no Campus Centro Politécnico da UFPR. As coordenadas desses vértices foram obtidas a partir do processamento dos dados pelo método de posicionamento relativo estático rápido. A qualidade das coordenadas precisas atenderam os critérios de ambiguidades resolvidas, DOP menor que 6 e a observação simultânea de pelo menos 5 satélites.

Conhecidas as coordenadas precisas dos pontos (Tabela 5 - 5.1.1), foram descritas trajetórias de forma que a antena GPS ocupasse os vértices de controle por aproximadamente 10 épocas (Figura 31), para determinação das diferenças entre as coordenadas de controle e as coordenadas medidas em tempo real.

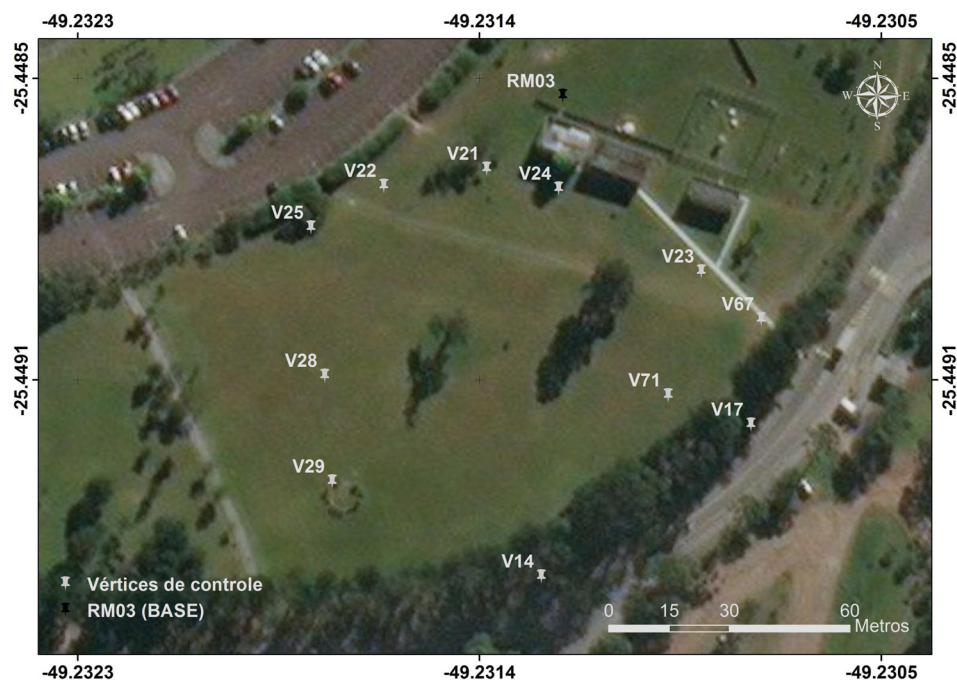


Figura 31 – Pontos de coordenadas precisas utilizadas como vértices de controle.

As Figuras 32 e 35 mostram as trajetórias percorridas. Os testes H1 e H2 representam o GPS Hemisphere operando isoladamente e os testes LH1 e LH2 os testes com operação simultânea com o GPS Leica 1200, para verificação de possíveis interferências devido a presença de sinais emitidos por outro equipamento.

O teste isolado apresentou um menor número de pontos armazenados durante o levantamento, sendo possível verificar perdas de informação na região oeste da área de estudo (Figura 32). Este fato pode ser explicado com análise dos parâmetros de qualidade do posicionamento. Geralmente os receptores GPS exportam os dados brutos para um arquivo RINEX. No entanto, como o GPS Hemisphere não possui essa opção, optou-se por acessar o serviço online da Trimble para analisar as condições da constelação NAVSTAR-GPS no momento do levantamento (Figura 33).

Mediante a uma análise conjunta das Figuras 33 e 34, verifica-se que entre as 11:30 e 11:45 horas, alguns satélites estavam próximos ao horizonte. Como este receptor não possui uma configuração para inserção de uma máscara de elevação, as pseudodistâncias medidas por esses satélites podem estar mais influenciadas pelo erro de refração troposférica, acarretando em erros nas coordenadas do posicionamento, ou mesmo, na invalidação destas.

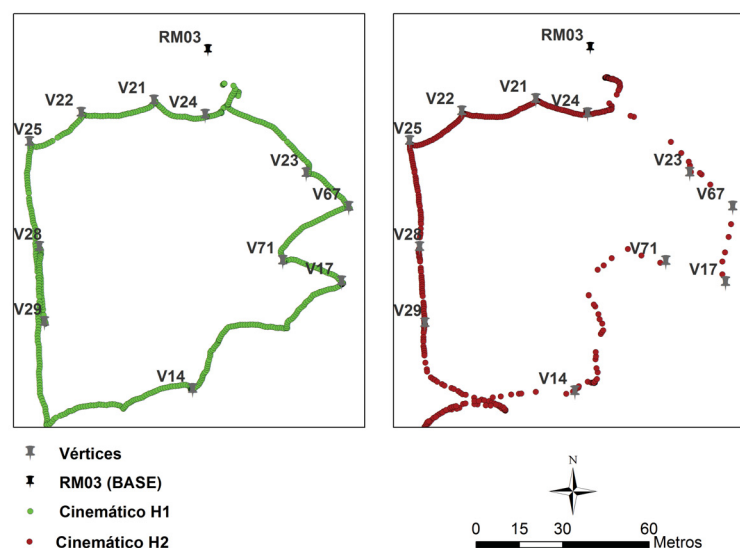


Figura 32 – Trajetórias realizadas com GPS Hemisphere com diferentes alturas de antena.

Usualmente, receptores geodésicos permitem a inserção de limites dos parâmetros como DOP e ângulo de elevação dos satélites, eliminando dados antes do levantamento. Os valores de referência retirados do INCRA (2013) são de DOP menor que 6 e máscara de elevação de  $15^\circ$  para minimizar erros troposféricos e de obstruções como edificações e vegetação. Porém, devido ao modelo Hemisphere A21 não possuir essas alternativas de configuração, o fabricante optou por adicionar um filtro interno que faz essa checagem da qualidade que não é descrito pelo fabricante. Dessa forma, os dados que não atenderem aos critérios desse filtro são automaticamente eliminados, não sendo possível realizar o seu pós-processamento.

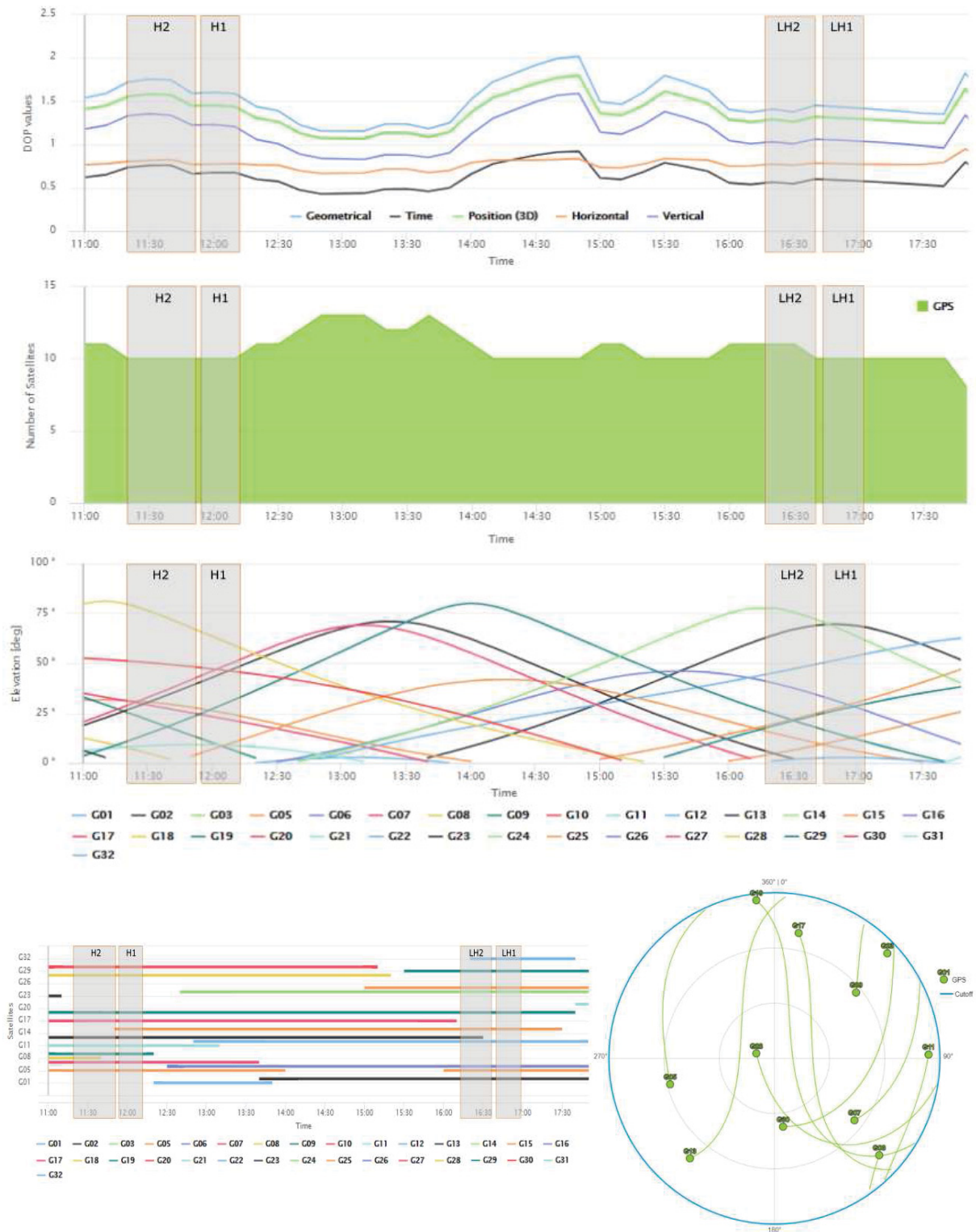


Figura 33 – Parâmetros da qualidade do posicionamento (DOP, número de satélites, elevação e visibilidade dos satélites) da constelação NAVSTAR-GPS no momento dos levantamentos.



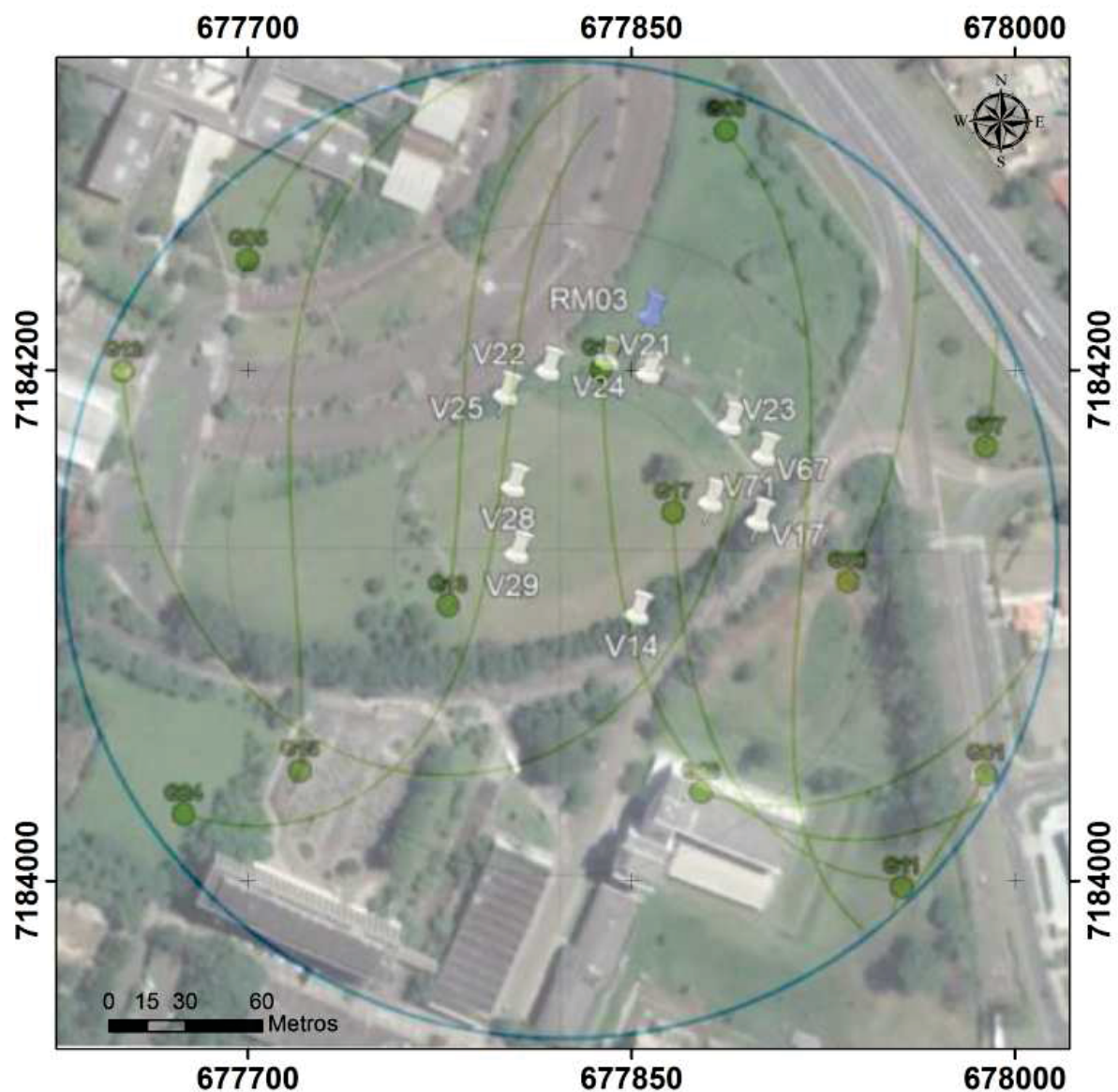


Figura 34 – Skyplot dos satélites da constelação GPS durante o levantamento com GPS Hemisphere. Sistema de Referência SIRGAS2000 / UTM zona 22S.

Fonte: Adaptado de Trimble Inc. (2018) e Google (2019).

Nos testes em que o GPS Hemisphere operava simultaneamente com GPS Leica e Rádio *Pacific Crest* (seção 4.3), as trajetórias foram realizadas mantendo-se uma distância aproximada de 1 metro entre as antenas, visando verificar potenciais interferências entre os sinais dos equipamentos em operação. As diferentes alturas da antena foram incrementadas com intuito de eliminar possíveis erros sistemáticos.

Quando observadas as discrepâncias entre os levantamentos isolados e simultâneos, algumas acurácias foram maiores nos testes simultâneos. Concluindo que o GPS Hemisphere não sofreu degradação do posicionamento devido aos sinais emitidos pela antena do GPS Leica e do rádio *Pacific Crest*.

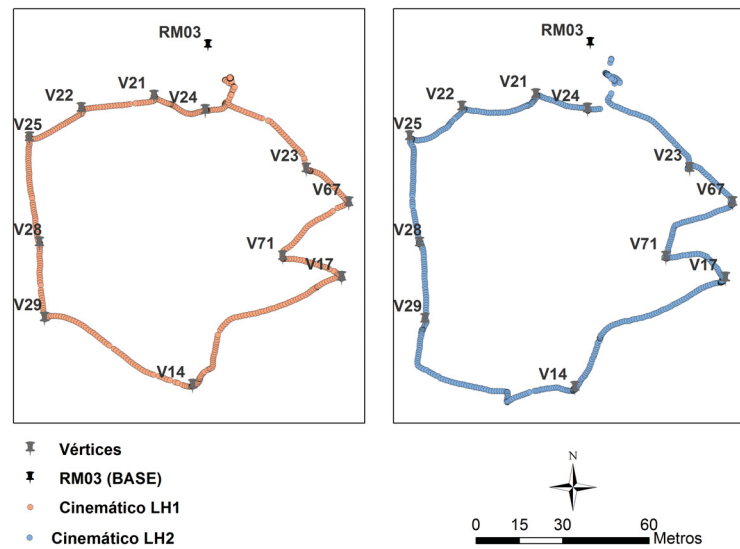


Figura 35 – Trajetórias realizadas com GPS Hemisphere simultaneamente com Leica com diferentes alturas de antena.

Outra análise realizada foi em relação a presença de obstruções. Foram escolhidos pontos com alto nível de obstrução (V14, V17, V21 e V25), nível médio (V22, V24, V67 e V71) e nível baixo (V23, V28, V29). Onde os pontos muito obstruídos possuíam densa vegetação ao seu redor, os pontos obstruídos possuíam obstrução nas proximidades do ponto e não obstruído não possuía nenhuma estrutura próxima ao ponto.

A partir do gráfico de elevação dos satélites (Figura 33) é possível observar que parte dos satélites disponíveis no momento do levantamento estavam abaixo de  $10^\circ$ . Associado com a densa vegetação presente na região à leste reduzem a qualidade do posicionamento.

As discrepâncias se encontraram entre 0,000 m (V22 - H2) e 35,93 m (V14 - H2) em latitude; 0,001 m (V67 - LH2) e 20,93 m (V25 - H1) em longitude; e 0,36 m (V17 - H1) e 2,9 m (V23 - LH2) em altitude (Tabelas 8, 9 e 10). Os valores mais altos foram obtidos nos pontos mais obstruídos.

As acurácias obtidas para os pontos com alta obstrução foram entre 0,003 m e 35,9 m em latitude; 0,002 m e 20,9 m em longitude; e 0,36 e 2,3 m em altitude. Para os locais com nível médio de obstrução as acurácias foram entre 0,00 m e 1,78 m em latitude; 0,001 m e 5,6 m em longitude; e 0,67 e 2,8 m em altitude. Para os pontos de baixa obstrução as acurácias foram entre 0,001 m e 0,22 m em latitude; 0,002 m e 2,88 m em longitude; e 0,77 e 2,9 m em altitude.

Os resultados obtidos corroboram com a classificação de obstruções adotada nesta pesquisa. Onde pontos com alta obstrução tendem a sofrer degradação do sinal e consequentemente degradação da qualidade do posicionamento. Isso mostra a importância de um bom planejamento, em que deve ser considerado as condições da constelação disponível

e a quantidade de obstruções presentes no entorno do local de interesse.

Tabela 8 – Discrepâncias das latitudes em relação aos vértices de referência.

Obstrução	Vértice	Latitude (m)			
		H1	H2	LH1	LH2
Alta	V14	0,015	35,929	0,003	29,316
	V17	0,040	0,150	0,103	0,977
	V21	0,240	0,350	0,060	0,006
	V25	0,014	0,016	0,018	0,005
Média	V22	0,245	0,000	0,001	0,009
	V24	0,062	0,056	0,018	0,012
	V67	0,004	0,522	0,013	0,541
	V71	0,129	1,780	0,030	0,201
Baixa	V23	0,218	0,014	0,033	0,130
	V28	0,183	0,066	0,115	0,001
	V29	0,029	0,006	0,042	0,001

Tabela 9 – Discrepância da longitude em relação aos vértices de referência.

Obstrução	Vértice	Longitude (m)			
		H1	H2	LH1	LH2
Alta	V14	0,134	0,113	0,097	0,016
	V17	0,076	10,814	0,010	0,181
	V21	0,002	0,008	0,069	0,383
	V25	20,925	0,466	15,381	0,256
Média	V22	0,021	0,032	0,056	1,297
	V24	0,385	0,671	0,154	0,178
	V67	0,247	5,612	0,004	0,001
	V71	0,109	0,059	0,106	0,010
Baixa	V23	0,002	2,878	0,106	0,774
	V28	0,070	0,021	0,028	0,018
	V29	0,068	0,009	0,106	0,081

Tabela 10 – Discrepância da altitude em relação aos vértices de referência.

Obstrução	Vértice	Altitude (m)			
		H1	H2	LH1	LH2
Alta	V14	2,06	1,27	1,42	0,40
	V17	0,36	1,77	1,39	2,14
	V21	0,81	2,22	2,28	2,30
	V25	0,42	2,32	0,86	1,70
Média	V22	1,06	2,21	1,77	1,77
	V24	0,67	2,33	1,98	1,97
	V67	0,84	1,45	1,36	2,85
	V71	1,14	1,03	1,37	2,21
Baixa	V23	0,77	2,68	1,36	2,93
	V28	1,09	2,22	1,35	1,13
	V29	1,00	1,94	1,37	1,25

Tabela 11 – Raiz do erro médio quadrático planimétrico, em metros, dos vértices considerando as quatro trajetórias.

Obstrução	Vértice	$RMSE_E$	$RMSE_N$	$RMSE_{up}$	$RMSE_{2D}$	$RMSE_{3D}$
Alta	V14	19,022	0,052	0,684	19,022	19,034
	V17	0,442	5,363	0,768	5,381	5,436
	V21	0,159	0,181	0,730	0,241	0,769
	V25	0,006	10,519	0,848	10,519	10,553
Média	V22	0,121	0,631	0,477	0,642	0,800
	V24	0,026	0,240	0,730	0,241	0,769
	V67	0,302	2,766	0,858	2,783	2,912
	V71	0,833	0,047	0,533	0,834	0,990
Baixa	V23	0,094	1,337	1,035	1,340	1,693
	V28	0,077	0,024	0,527	0,081	0,533
	V29	0,019	0,041	0,398	0,045	0,401



## 6.2 TESTES PERFILADOR ACÚSTICO DE EFEITO DOPPLER (ADCP)

A seção foi dividida em testes estático e cinemático, onde o método de posicionamento RTK foi aplicado associado às medições de profundidade coletadas com uma haste graduada (ROD). Onze pontos foram distribuídos ao longo da área controle (piscina) indicados na Tabela 12, para validação dos dados coletados com os sensores acústicos (SBES e ADCP). O SBES utilizou o posicionador absoluto adquirido no conjunto com o ecobatímetro SDE-28S do fabricante *South Surveying & Mapping Technology*. Quando se trata de levantamentos batimétricos os sensores acústicos monofeixe são equipamentos que se enquadram dentro das especificações técnicas vigentes. Assim, as profundidades foram medidas com SBES com a finalidade de serem usadas na comparação da batimetria obtida com o ADCP M9 da *SonTek*. A partir dos dados planimétricos e de profundidade, do teste cinemático, foram gerados modelos digitais de elevação (MDE) para análises da viabilidade do uso do ADCP na determinação da batimetria.

Tabela 12 – Profundidades pontuais coletadas na área controle com uma haste graduada e suas respectivas coordenadas obtidas a partir do método RTK. Sistema de referência WGS-84 / UTM zona 22S.

Pontos	E [m]	N [m]	Profundidade [m]
1	675966,545	7186872,199	-1,214
2	675965,525	7186872,275	-1,231
3	675963,594	7186872,491	-1,243
4	675961,557	7186872,750	-1,261
5	675959,082	7186872,987	-1,282
6	675959,400	7186876,419	-1,282
7	675960,911	7186876,308	-1,273
8	675962,360	7186876,159	-1,261
9	675963,789	7186875,993	-1,244
10	675965,320	7186875,837	-1,231
11	675966,872	7186875,702	-1,214


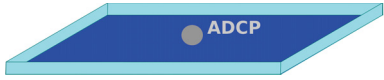
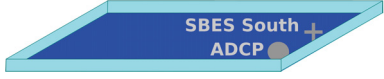
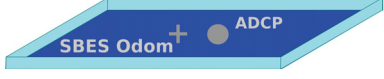
### 6.2.1 Teste estático

Os testes estáticos foram divididos em quatro categorias: ADCP posicionado às margens (ET1), no centro da piscina (ET2), operando próximo à margem simultaneamente com um ecobatímetro monofeixe do fabricante *South Surveying & Mapping Technology* de 200 kHz (ET3) e, operando simultaneamente com um ecobatímetro monofeixe do fabricante *Teledyne Odom Hydrographic* de 208 kHz no centro da área de controle a uma distância de aproximadamente 1,5 metros (ET4). As medições com bastão graduado (ROD) e posicionamento RTK foram usados como valores de referência na determinação das discrepâncias (Tabela 13).

As profundidades coletadas com ambos ecobatímetros monofeixe (SBES) foi de 1,2 metros durante todo o levantamento estático. O SBES *South* alocado próximo as margens,

onde a profundidade medida com a haste graduada foi de 1,216 m. E para a localização do SBES *Odom*, no centro da área de controle, deveria fornecer profundidade de 1,25 m. Os dois sensores subestimaram as profundidades tomadas como referência (ROD), onde as discrepâncias foram de 0,016 m para o SBES *South* e 0,05 m para o SBES *Odom*. Apesar dessa diferença, os valores se encontram dentro da imprecisão dos sensores de 0,1% da profundidade, não apresentando problemas nas medições.

Tabela 13 – Profundidades de referência obtidas com a haste graduada e posicionador RTK (ROD) para cada cenário (ET1, ET2, ET3 e ET4) de acordo com a configuração indicada em cada ilustração na sequência.

TESTE	ROD [m]	CENÁRIO
ET1	1,216	
ET2	1,249	
ET3	1,216	
ET4	1,248	

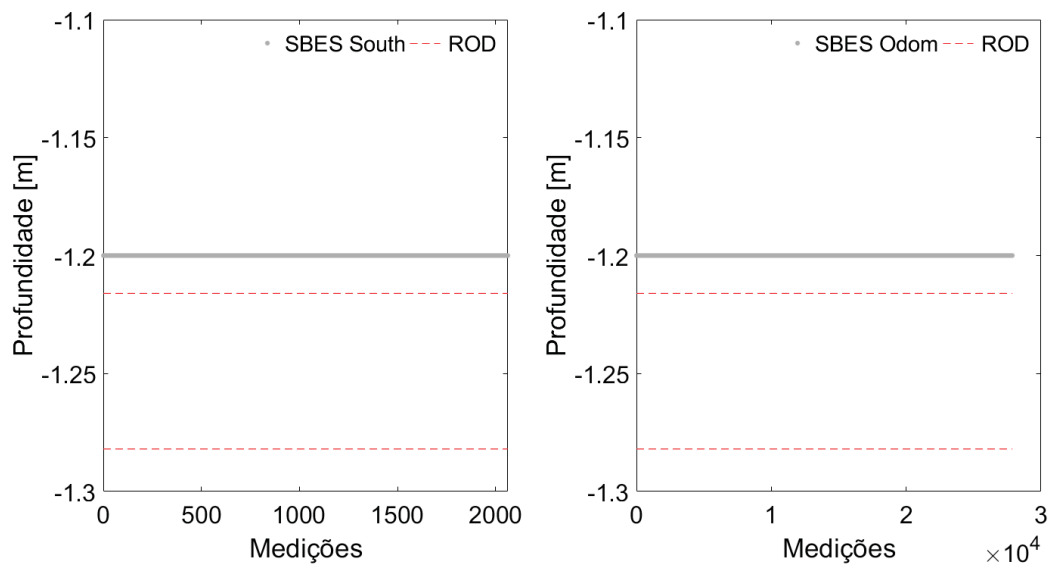


Figura 36 – Gráficos das profundidades coletadas com SBES *South* à esquerda; e à direita com SBES *Odom*. Em ambos os gráficos as linhas tracejadas em vermelho representam as profundidades limite da área de controle, obtidas com a haste graduada.

Para que as medições fossem consistentes, considerando a homogeneidade da área levantada, os dados deveriam se encontrar entre as linhas tracejadas em vermelho (Figura 37), as quais representam os limites de referência (ROD), obtidos com o bastão graduado e posicionamento RTK. No entanto, em todos os casos, foram observadas profundidades

fora do intervalo de referência, mostrando inconsistência em parte do conjunto de dados. Especificamente no teste com a presença do SBES *Odom* (ET4) ocorreu o registro de profundidades próximas a zero. Provavelmente, o ADCP recebeu os sinais emitidos pelo SBES como se fossem os sinais de retorno do seu próprio transdutor. Como existe uma inclinação de  $25^\circ$  em relação ao feixe vertical, o sinal emitido pelo SBES foi detectado pelo ADCP imediatamente, fazendo com que calculasse a profundidade a partir desse intervalo de tempo.

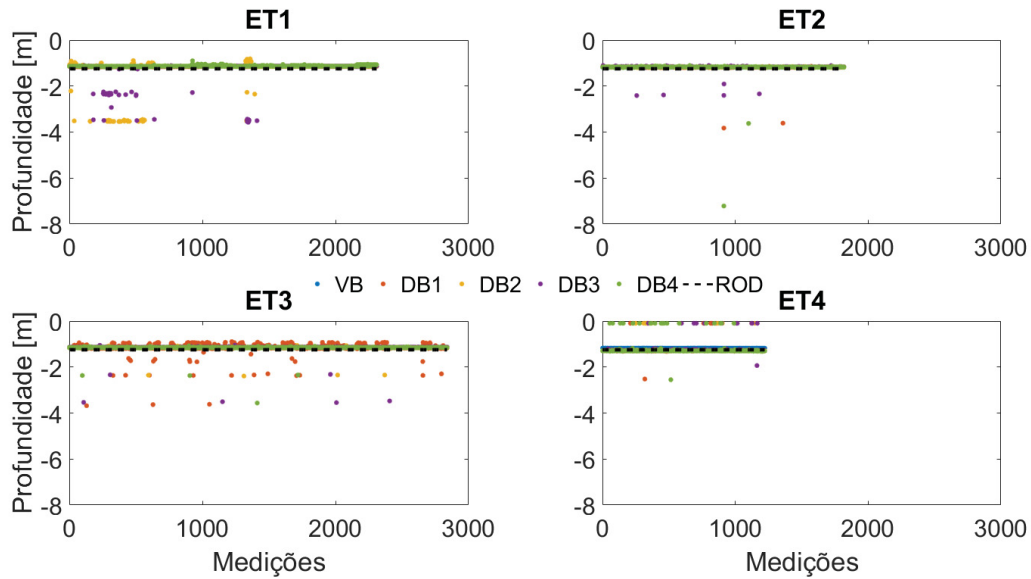


Figura 37 – Gráficos dos dados brutos das profundidades coletadas, com feixes vertical (VB) e doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP, ao longo do tempo, para os testes estáticos. Onde as linhas pretas tracejadas representam os limites da área de controle obtidos com bastão graduado (ROD).

O teste ET1 apresentou a maior parte das medições na classe 3, ou seja, acima dos valores de referência (ROD), como observado na Figura 38. Os feixes DB1 e DB4 não registraram profundidades maiores que a referência ROD, que pode ter sido influenciada pela proximidade das margens, fazendo com que os feixes inclinados atingissem o fundo e retornassem diretamente ao ADCP. Os feixes DB2 e DB3 registraram menos de 10% de profundidades maiores que 2 metros. Provavelmente, esses últimos dois feixes estavam posicionados mais afastados das margens, deixando uma maior área para a reflexão dos feixes até retornar ao transdutor visto que o material da piscina é muito reflexivo.

As profundidades calculadas pelos feixes Doppler foram de 0,8 m (DB2) a 3,6 m (DB3), com desvios padrão entre 0,007 m (DB1) e 0,41 m (DB2) (Tabela 14). As discrepâncias entre as medições com os feixes Doppler do ADCP e a medição manual (ROD) foi entre 0,03 (DB3) e 2,36 m (DB3), proporcionando RMSE de 0,07 m (DB1) a 0,41 m (DB2). Para o feixe vertical as variações das profundidades foram de 0,007 m, com desvio padrão de 0,001 m. Consequentemente seu RMSE foi baixo, de 0,07 m, apresentando erros absolutos entre 0,065 m e 0,072 m.

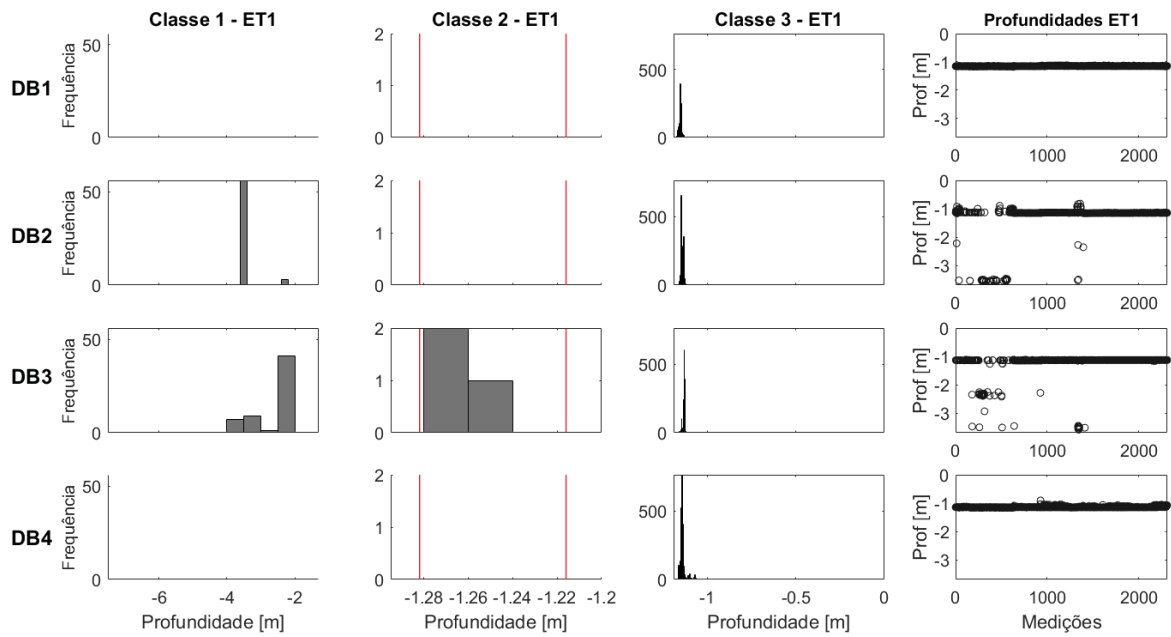


Figura 38 – Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET1. Onde o intervalo entre as linhas verticais vermelhas representam o limite da área de controle obtida com bastão graduado. À direita estão plotadas as profundidades.

Quando posicionado o sensor no centro da área de controle (ET2), as maiores frequências foram observadas com profundidades menores que as profundidades de referência (classe 3), representadas pelas linhas verticais vermelhas dos histogramas da classe 2 na figura 39. Todos os feixes Doppler, exceto o feixe DB2, registraram profundidades maiores que 1,5 metros. As profundidades variaram entre 1,1 m (DB4) e 7,2 m (DB4), apresentando desvios padrão entre 0,007 (DB2) m e 0,16 m (DB4), como indicado na Tabela 14). Apesar desses valores se encontrarem com baixas frequências, indicam a presença de dados espúrios no conjunto de dados. Quando comparados com os valores de referência, as discrepâncias nas profundidades flutuaram entre 0,04 m (DB1 e DB4) e 5,9 m (DB4), onde o Erro Médio Quadrático (RMSE) obtido foi de 0,08 m (DB2) e 0,17 m (DB4), para os feixes Doppler. O feixe vertical mostrou-se estável apresentando variação de apenas 0,008 m entre as medições, com desvio padrão de 0,001 m. A partir das profundidades de referência, as discrepâncias atingiram 0,07 m com RMSE de 0,07 m (Tabela 14).

A presença do SBES *South* nas medições do ADCP gerou a maior frequência de registros de altas profundidades, maiores que 1,5 m, em todos os feixes Doppler do teste ET3 (Figura 40), quando comparado com o ADCP operando isoladamente (ET1). O intervalo de profundidades foi de 0,89 m (DB1) a 3,7 m (DB1), com desvios padrão entre 0,05 m (DB2) e 0,13 m (DB1) (Tabela 14). Os valores de referência (ROD) foram usados para determinar o RMSE que apresentou valor máximo de 0,16 m para o feixe DB1. O erro absoluto foi de 0,036 m (DB1) a 2,4 m (DB1), indicando que não é possível eliminar

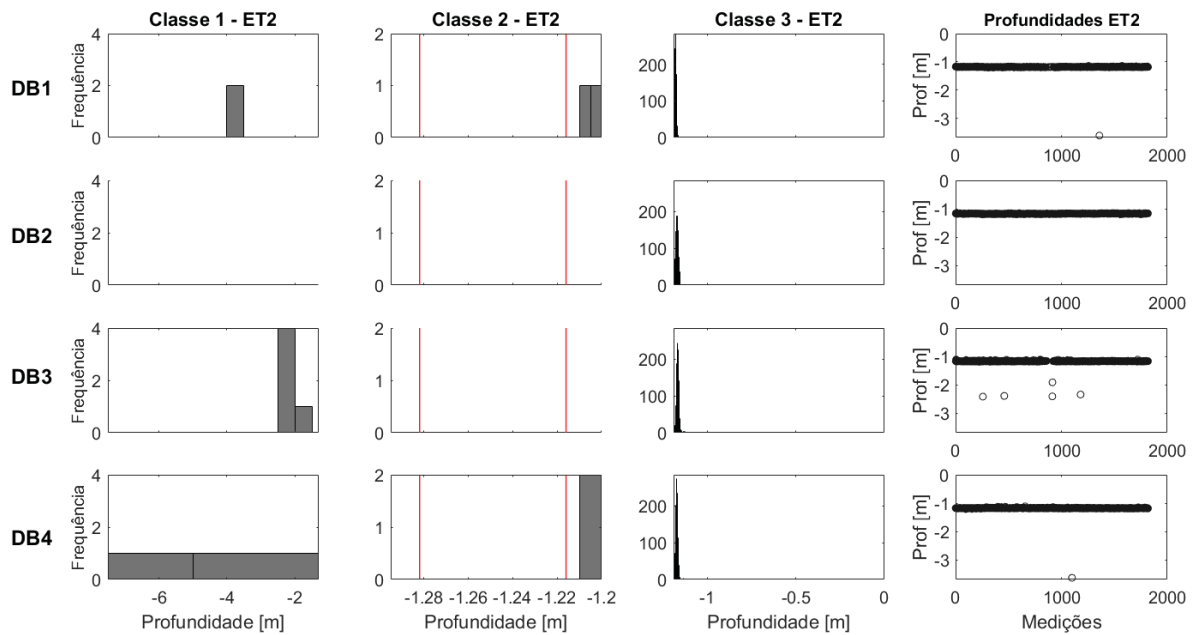


Figura 39 – Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET2. Onde a linha vertical vermelha representa os limites da área de controle obtida com bastão graduado. À direita estão plotadas as profundidades.

todos os dados do feixe que apresentar maior erro.

A causa das menores profundidades pode ter sido influenciada pela pequena distância entre o transdutor e a parede da área de controle, que somado ao ângulo de abertura dos feixes Doppler, causou uma redução no tempo entre a emissão e retorno do sinal. E que se intensificou com a presença dos sinais emitidos pelo SBES que estava a 1,5 m do ADCP. O feixe vertical apresentou variações pequenas, de 0,02 m entre as medições, com desvio padrão de 0,002 m. O RMSE foi de 0,09 m, com discrepâncias absolutas variando entre 0,08 m e 0,10 m. A maior estabilidade do feixe vertical, deve-se ao fato de que este feixe está apontado diretamente para o fundo, diminuindo as chances de reflexão secundária, a menos que o sensor tivesse sofrido movimentos de arfagem (longitudinal), balanço (transversal) e/ou cabeceio (vertical).

O levantamento ET4 apresentou um comportamento um pouco diferente dos demais (Figura 41). A maior frequência dos registros se encontram abaixo da profundidade máxima, ao contrário dos testes ET1, ET2 e ET3 em que as maiores frequências obtiveram profundidades menores que a profundidade de referência mínima. Acredita-se que o ecobatímetro Odom tenha causado essas variações. As profundidades registradas encontraram-se dentro do intervalo de -0,10 m para todos os feixes Doppler e -2,55 m para os feixes DB1 e DB4, com desvios padrão entre 0,1 m (DB1) e 0,17 (DB4) (Tabela 14). OS RMSE mínimo e máximo foram de 0,13 m para o feixe DB1 e 0,18 m para o feixe DB4, onde os erros absolutos variaram de 0,002 m (DB4) a 1,134 m (DB4). Acerca do feixe vertical (VB) as

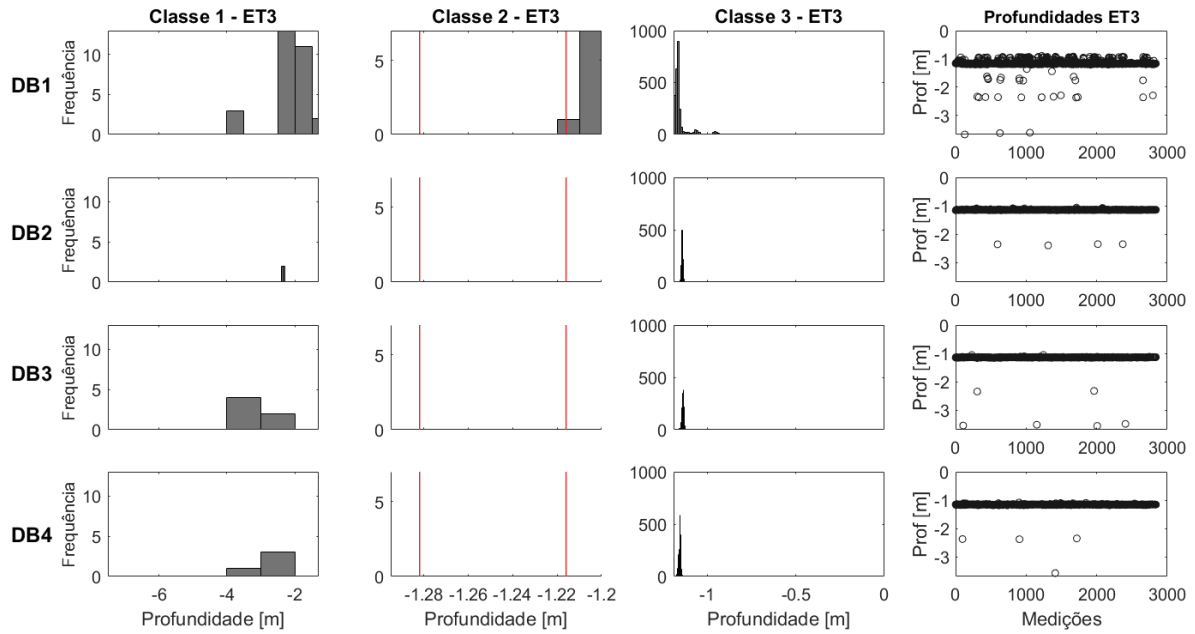


Figura 40 – Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET3. Onde a linha vertical vermelha representa os limites da área de controle obtida com bastão graduado. À direita as profundidades pelo seu número amostral foram plotadas.

flutuações foram de 0,012 m, com desvio padrão de 0,001 m, RMSE de 0,033 m e erro máximo de 0,038 m em relação às medições de referência (ROD).

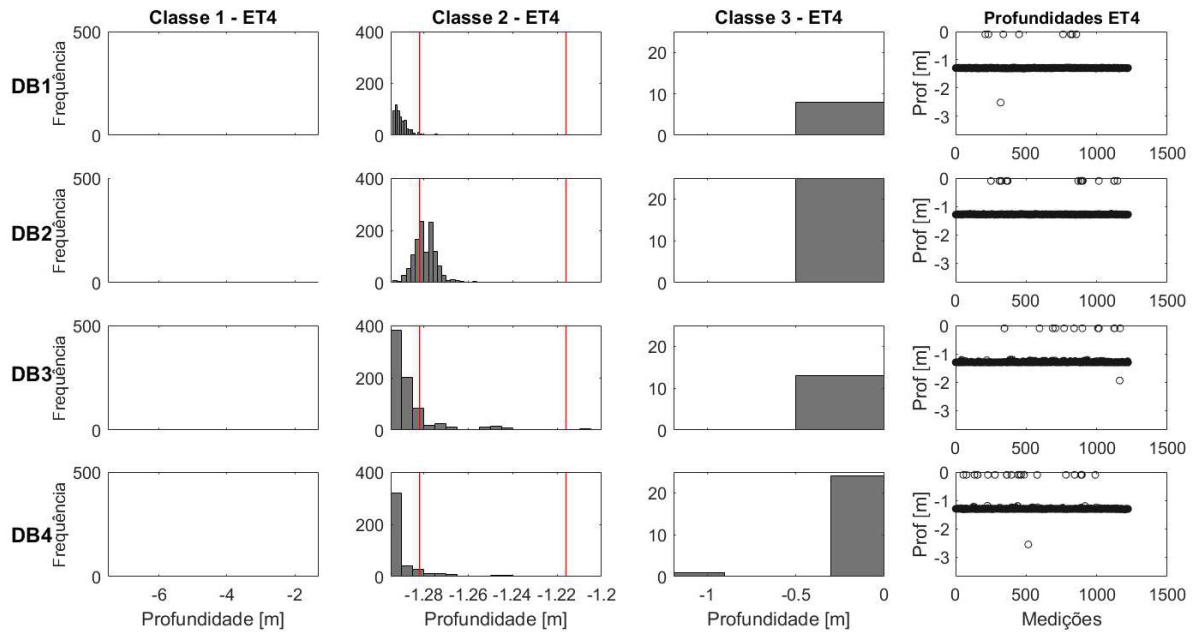


Figura 41 – Histograma dos dados brutos das profundidades coletadas, com os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP para o cenário ET4. Onde a linha vertical vermelha representa os limites da área de controle obtida com bastão graduado. À direita as profundidades pelo seu número amostral foram plotadas.

Todos os levantamentos com ADCP apresentaram uma subestimação quando comparados com os valores de referência (ROD). No entanto, considerando que o SBES *South* também apresentou tal comportamento, conclui-se que essa discrepância se deve a incerteza dos sensores e/ou erros sistemáticos na hora do levantamento. Os testes ET1 e ET3 apresentaram profundidades médias menores que os testes ET2 e ET4 por estarem associados às medições na região de menor profundidade. Adicionalmente, a presença de barreira física devido as margens podem ter reduzido o intervalo entre a emissão e recepção do sinal acústico, onde os sinais atingiram as paredes e retornaram para o transdutor antes de atingirem o fundo. Todos os testes registraram grandes intervalos de profundidade (maiores que o metro) mesmo o sensor estando estático, proporcionando uma distribuição não normal como mostra os histogramas das figuras 38, 39, 40 e 41.

A Figura 42 do feixe vertical mostra exatamente essa diferença entre os levantamentos, onde os testes em que os sensores foram posicionados às margens apresentam menores profundidades, e aqueles de posição central registraram profundidades maiores. Esse feixe teve um comportamento similar aos ecobatímetros, com pequenas flutuações, devido ao feixe estar posicionado para o nadir. Dessa forma o sinal atinge o fundo e retorna diretamente para o sensor, não refletindo em outras superfícies como o que aconteceu com os feixes Doppler, que possuem um ângulo de  $25^\circ$  em relação a vertical.

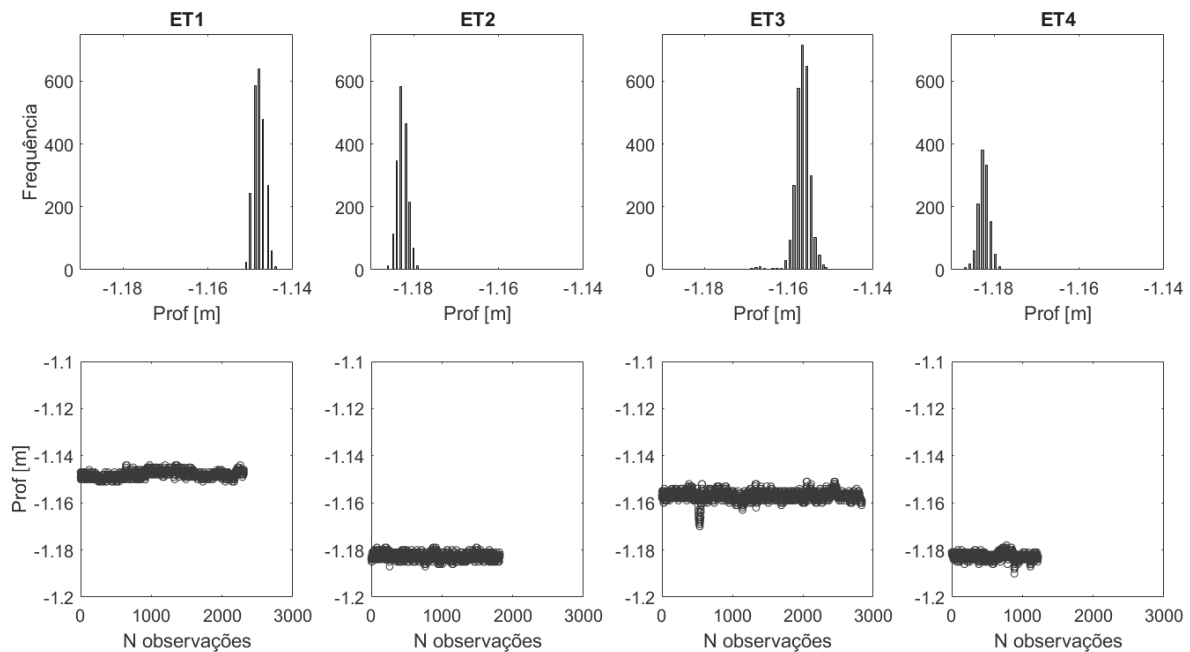

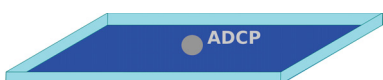

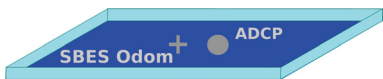


Figura 42 – Histogramas e gráfico das profundidades do feixe vertical para cada cenário (ET1, ET2, ET3 e ET4).

Ao comparar os levantamentos ET1 e ET3 (posição marginal dos sensores); e ET2 e ET4 (posição central dos sensores), em que o ADCP foi posicionado da mesma forma, observa-se um maior erro principalmente nos feixes Doppler (DB) para os testes ET3 e



Tabela 14 – Valores de profundidades mínima, máxima, média desvio padrão (desv pad), diferenças mínima (dif min) e máxima (dif max) da medição dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP em relação às medições manuais (ROD) em metros; e o erro médio quadrático (RMSE), para cada cenário (ET1, ET2, ET3 e ET4).

		DB1	DB2	DB3	DB4	VB	Cenário
ET1 margem	prof min	1,123	0,818	1,109	0,901	1,144	
	prof max	1,181	3,547	3,577	1,164	1,151	
	prof média	1,151	1,213	1,181	1,139	1,148	
	desv pad	0,007	0,414	0,285	0,018	0,001	
	dif min	0,035	0,055	0,033	0,052	0,065	
	dif max	0,093	2,331	2,361	0,315	0,072	
	RMSE	0,065	0,413	0,287	0,080	0,068	
ET2 centro	prof min	1,142	1,146	1,110	1,109	1,179	
	prof max	3,826	1,197	2,414	7,215	1,187	
	prof média	1,184	1,171	1,170	1,177	1,183	
	desv pad	0,088	0,007	0,062	0,157	0,001	
	dif min	0,044	0,052	0,058	0,043	0,062	
	dif max	2,577	0,103	1,165	5,966	0,070	
	RMSE	0,110	0,078	0,100	0,173	0,066	
ET3 margem+SBES	prof min	0,894	1,063	1,052	1,081	1,151	
	prof max	3,683	2,392	3,547	3,564	1,170	
	prof média	1,164	1,143	1,142	1,157	1,157	
	desv pad	0,133	0,051	0,104	0,061	0,002	
	dif min	0,036	0,088	0,080	0,065	0,078	
	dif max	2,435	1,144	2,299	2,316	0,097	
	RMSE	0,157	0,117	0,148	0,109	0,091	
ET4 centro+SBES	prof min	0,099	0,099	0,099	0,099	1,178	
	prof max	2,522	1,297	1,937	2,552	1,190	
	prof média	1,289	1,256	1,279	1,274	1,183	
	desv pad	0,103	0,167	0,124	0,170	0,001	
	dif min	0,059	0,034	0,006	0,002	0,026	
	dif max	1,306	1,117	1,117	1,336	0,038	
	RMSE	0,126	0,172	0,139	0,180	0,033	

ET4 onde há a presença do sensor acústico SBES operando simultaneamente ao ADCP. É possível verificar visualmente as discrepâncias pelos gráficos de profundidade nas Figuras 38, 39, 40 e 41. O cenário ET1 apresentou dados espúrios nos feixes DB2 e BD3, indicando que esses feixes estavam mais afastados da borda, o que influenciou a um maior tempo de reflexão do sinal (sinais secundários que refletiram em várias superfícies antes de retornar ao sensor), consequentemente resultando em maiores profundidades.

O cenários ET3 com a operação simultânea do ADCP e SBES *South* apresentou medições discrepantes em todos os feixes, com maior frequência no feixe DB1. Apesar do ADCP não apresentar profundidades menores que 0,50 m, a frequência de profundidade maior que 2 metros, foi mais alta no teste em que o SBES operou simultaneamente (ET3). Provavelmente, os sinais refletidos do SBES foi detectado pelo ADCP antes mesmo de chegar ao fundo. Nos casos em que baixas profundidades foram encontradas no feixe DB1 do teste ET3, indica que o feixe estava muito próximo à margem, fazendo com que o

tempo de retorno do sinal fosse menor pois o sinal era refletido na parede e não no fundo da área de controle, proporcionando menores profundidades.

O cenário ET4 sofreu influência do SBES já que o cenário ET2 estava com a mesma configuração, exceto pelo ADCP estar operando isoladamente. Quando comparadas as mesmas configurações, esperava-se que os resultados fossem similares, porém o ET4 registrou profundidades mínimas de 10 cm com a presença de outro sensor acústico. Ambos os SBES proporcionaram valores próximos às profundidades de referência, porém o SBES *South* apresentou uma menor diferença. Portanto, o SBES *Odom* será descartado e o SBES *South* será usado na análise do teste cinemático como referência.

### 6.2.2 Testes cinemáticos

Os testes cinemáticos foram subdivididos em ROD x SBES (seção 6.2.2.1), ROD x ADCP (seção 6.2.2.2), e SBES x ADCP (seção 6.2.2.3). A seção 6.2.2.1 foi realizada com o objetivo de identificar erros sistemáticos nas medições com SBES por meio de comparação com as medições manuais (ROD). Após conferir a consistência dos dados do SBES, o mesmo procedimento foi realizado com ADCP na seção 6.2.2.3. Onde posterior a comparação entre dos dados brutos do ADCP e ROD foram gerados os modelos de regressão linear para o ajustamento dos dados do ADCP. Os resultados desse ajustamento serão usados com referência para posterior comparação com o ajustamento usando o SBES (seção 6.2.2.1).

Em todas as seções foram usados os mesmo conjuntos de dados obtidos nos testes CT1, CT2, CT3 e CT4. As Figuras 43, 44, 45 e 46 mostram os gráficos com as profundidades calculadas para os feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) e seus respectivos histogramas de frequência. Estes foram divididos em 3 classes, onde as linhas verticais em vermelho representam os limites das profundidades da área de controle. Embora algumas medições tenham se enquadrado nas classes 1 e 3 com os valores fora das medições manuais (ROD) usadas como referência, as maiores frequências se encontraram concentradas na classe 2 onde estão as profundidades obtidas com a haste graduada (ROD) da Tabela 12.

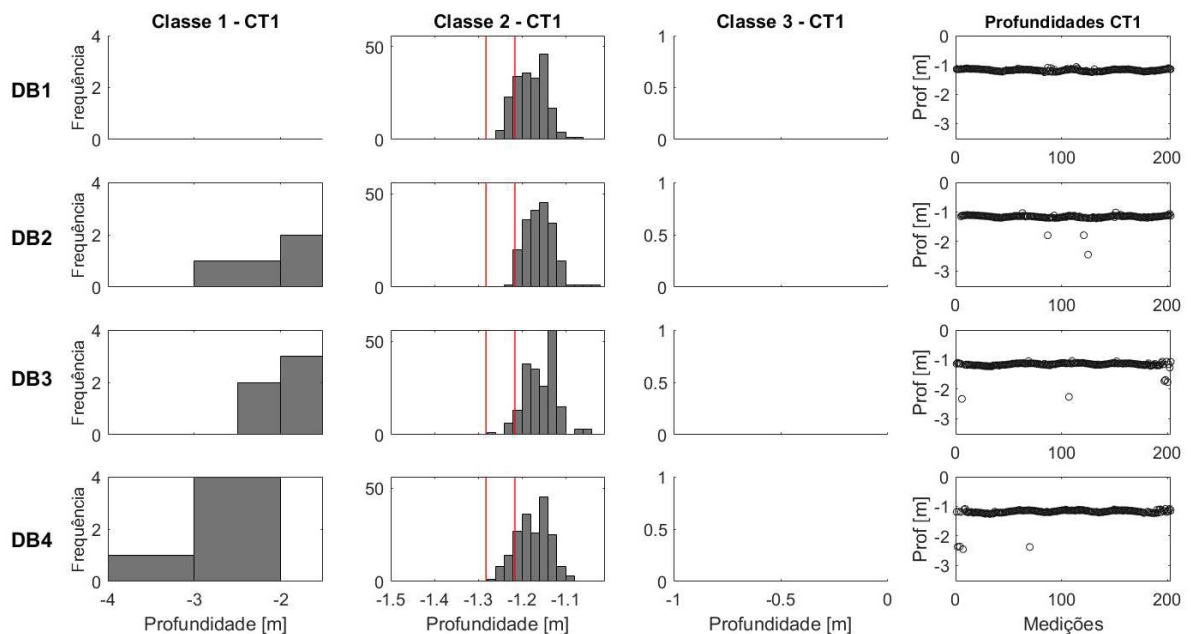


Figura 43 – À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT1.

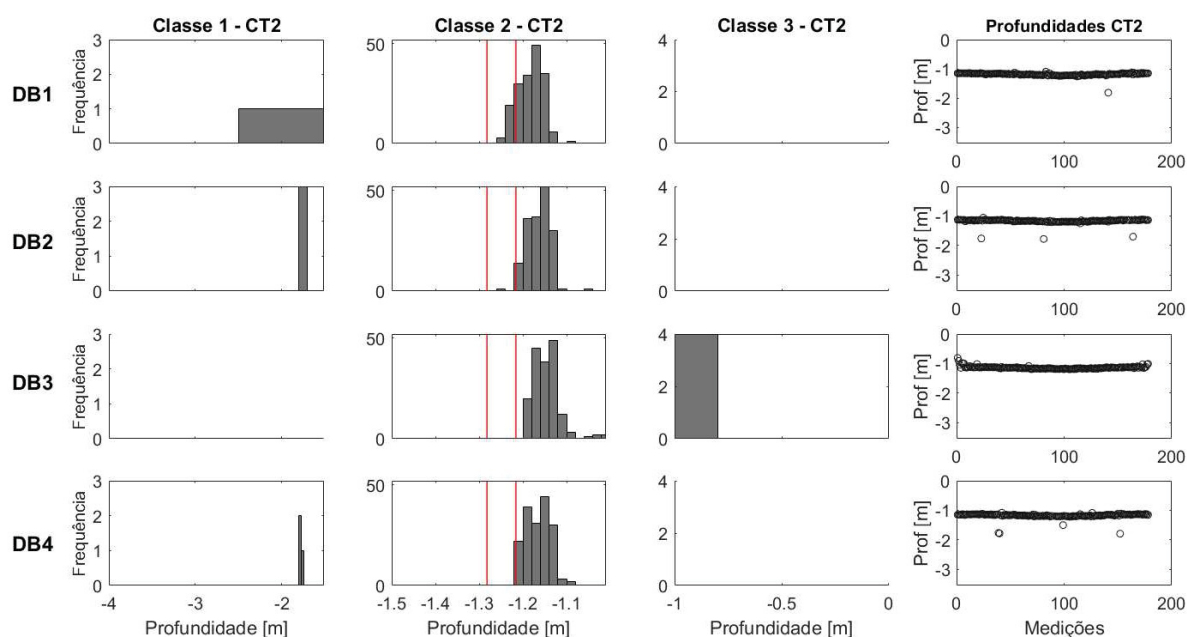


Figura 44 – À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT2.

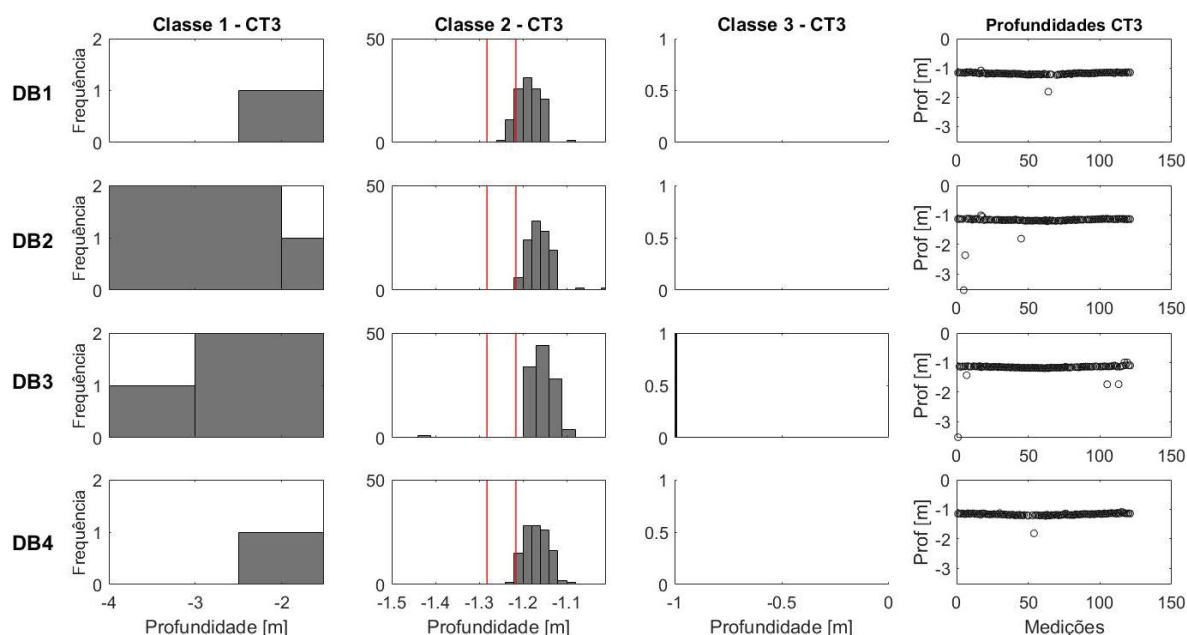


Figura 45 – À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT3.

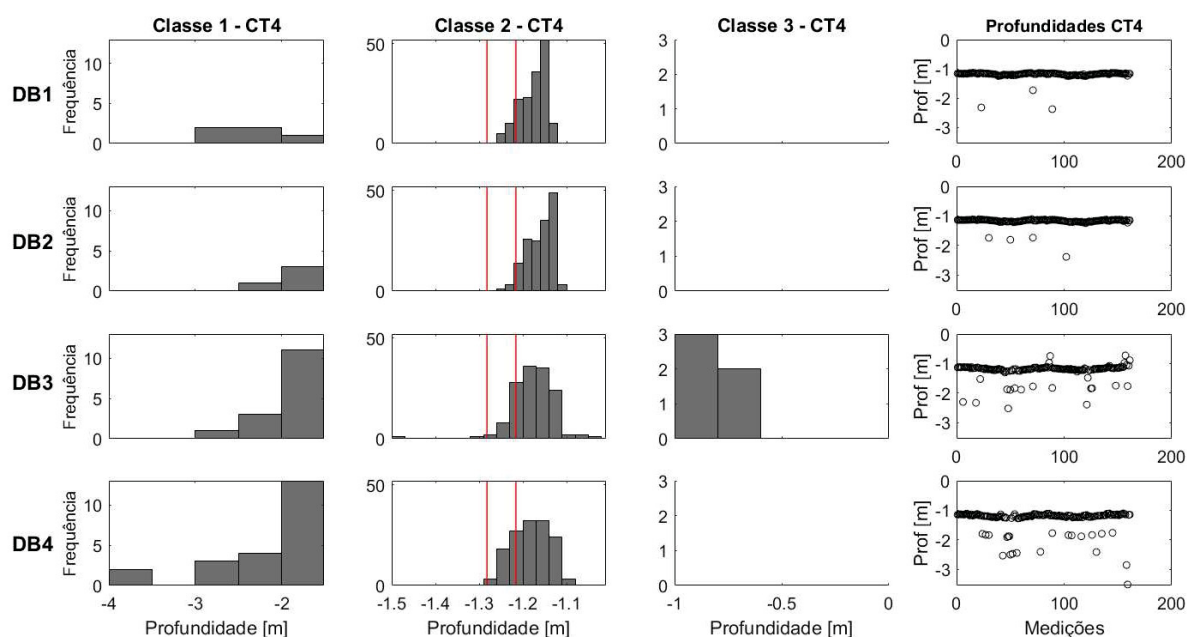


Figura 46 – À esquerda: Histogramas das profundidades brutas coletadas com os quatro feixes Doppler (DB1,DB2, DB3 e DB4) do ADCP divididos em 3 classes, onde as linhas vermelhas indicam as profundidades mínima e máxima obtidas com a haste graduada. À direita: Gráfico das profundidades brutas dos feixes Doppler do ADCP para o cenário CT4.

Tabela 15 – Valores mínimo, máximo, média e desvio padrão, em metros, da profundidade em módulo para cada feixe do ADCP, vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), para cada cenário (CT1, CT2, CT3 e CT4) obtidos na área de controle.

		DB1	DB2	DB3	DB4	VB	Cenário
CT1	min	1,068	1,021	1,050	1,087	1,143	
	max	1,254	2,449	2,334	3,632	1,218	
	média	1,179	1,172	1,177	1,211	1,176	
	desv pad	0,034	0,116	0,137	0,247	0,025	
CT2	min	1,094	1,057	0,810	1,082	1,142	
	max	1,813	1,781	1,198	1,795	1,219	
	média	1,186	1,174	1,141	1,178	1,175	
	desv pad	0,055	0,081	0,048	0,088	0,024	
CT3	min	1,088	1,013	0,995	1,091	1,142	
	max	1,814	3,549	3,533	1,817	1,218	
	média	1,192	1,200	1,183	1,175	1,177	
	desv pad	0,063	0,256	0,236	0,065	0,024	
CT4	min	1,131	1,109	0,727	1,104	1,137	
	max	2,375	2,389	2,524	3,738	1,230	
	média	1,194	1,179	1,242	1,323	1,174	
	desv pad	0,140	0,130	0,257	0,413	0,029	

A Tabela 15 apresenta as profundidades brutas obtidas com o ADCP entre -3,7 m e -0,73 m, com desvios padrão entre 0,02 m e 0,41 m. O feixe vertical mostrou-se estável durante as medições, com desvios padrão praticamente constantes para os quatro cenários. Em contrapartida, os feixes Doppler proporcionaram amplitudes maiores que 3 metros. O feixe DB4 no cenário CT4, com o ADCP percorrendo trajetórias às margens da área de controle, apresentou maior profundidade e consequentemente um alto desvio padrão.

### 6.2.2.1 Área de controle - ROD x SBES

À esquerda da figura 47, as medições da haste em linha tracejada variaram entre -1,282 e -1,216 metros. Os dados SBES em linha contínua variaram entre -1,327 m e -1,237 m. O SBES apresentou um comportamento muito semelhante ao do ROD manifestando diferenças dentro da imprecisão do equipamento de 0,1% da profundidade.

A comparação da medição manual com o SBES mostrou uma variação do erro absoluto da profundidade, em módulo, entre 0,070 m e 0,007 m (histograma à direita da Fig. 47). A distribuição de frequência apresenta um comportamento quase gaussiano onde o coeficiente de determinação do modelo de regressão foi de 0,97, indicando uma correlação de 99%.

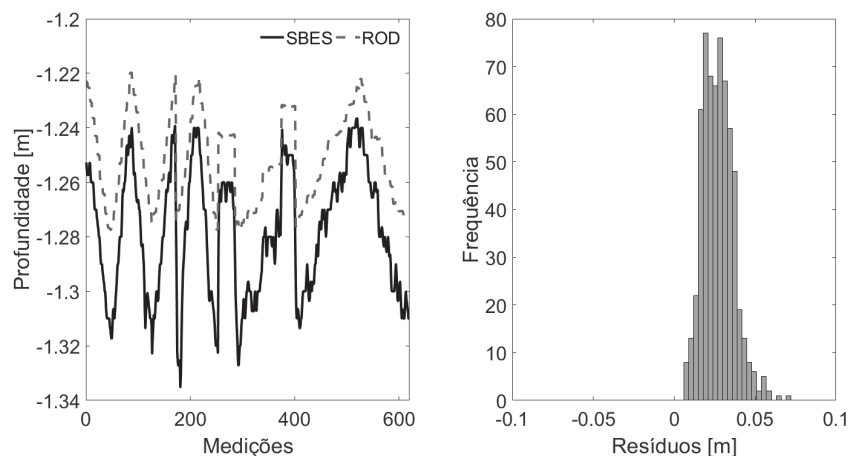


Figura 47 – Esquerda: Gráfico de profundidade do SBES e medições manuais (ROD). Direita: Histograma dos resíduos do SBES em relação ao ROD.

O volume calculado a partir dos dados do SBES foi de 31,45 m<sup>3</sup>, divergindo em 2% do volume de referência medido pela haste de 30,79 m<sup>3</sup>, concluindo que sonda de feixe único (SBES) não foi influenciada por erros sistemáticos. Apesar dessa discrepância, o SBES apresentou um conjunto de dados estável com um desvio padrão dos dados de profundidade de 0,024 m e um RMSE de 0,029 m. A diferença pode estar relacionada com a precisão do sensor acústico, e/ou a técnica de posicionamento planimétrico utilizada no levantamento.

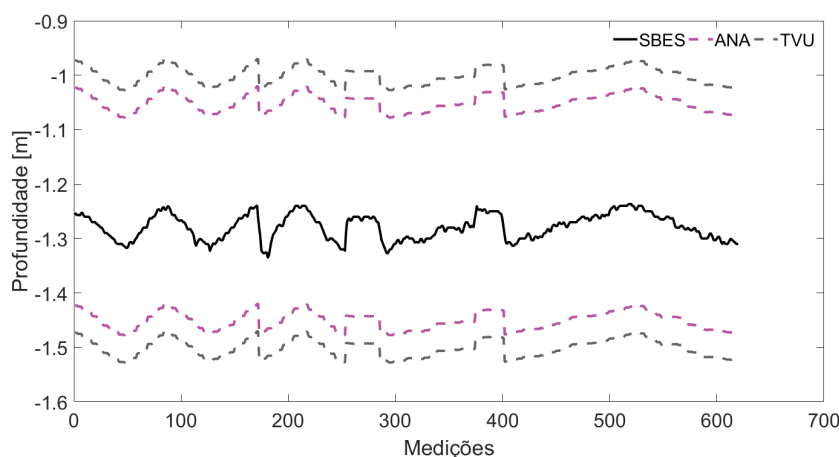


Figura 48 – Gráficos de profundidade do SBES e tolerâncias de medições manuais (ROD TUV) de acordo com as especificações técnicas da IHO.

Mesmo o teste estatístico de Wilcoxon, rejeitando a hipótese  $H_0$  de que as amostras provém de uma mesma distribuição, os resíduos entre as medições SBES e ROD foram inferiores a 0,10 metros, enquadrando-se dentro das especificações técnicas determinadas pela ANA. Como observado na figura 48, as medições situaram-se dentro da Incerteza Vertical Total (TVU), tolerância permitida pelas especificações técnicas da IHO (2020). Considerando o posicionador absoluto utilizado, este não apresentou deslocamento de profundidade no plano planimétrico que pudesse prejudicar o levantamento. Não foram identificados erros sistemáticos nos dados obtidos com o SBES, sendo possível utilizá-lo como referência na fase de análise dos dados ADCP.

#### 6.2.2.2 Área de controle - ROD x ADCP

O objetivo desta etapa foi identificar as dependências dos padrões de levantamento na acurácia dos dados. Como mostrado na seção 5.2.1.2, os diferentes padrões de transectos e longitudinais foram conduzidos com SBES e ADCP. O SBES e as medições manuais não revelaram qualquer diferença em relação a este aspecto. No entanto, as diferenças dos dados ADCP, estavam principalmente associadas ao fato do ADCP emitir 5 feixes (4 inclinadas e 1 vertical) em comparação com o feixe vertical único do SBES. Assim, os ecos do leito e da parede (isto é, ao medir próximo da parede) mas também os ecos secundários da superfície da água (isto é, dos feixes inclinados que refletiram mais de uma vez sobre uma superfície) afetaram a precisão do levantamento, acrescentando aos dados um ruído incoerente.

As profundidades brutas do ADCP variam entre -3,7 m e -0,8 m (Figura 49). As linhas tracejadas em preto representam os valores mínimo (-1,214 m) e máximo (-1,282 m) de profundidade, medidos com uma haste graduada e técnica de posicionamento RTK (Tabela 12). Observa-se que os ruídos devido às medições próximas as paredes e os ecos



secundários causam o cálculo de profundidades espúrias. Os pontos em diferentes cores representam as profundidades obtidas com cada feixe do ADCP (VB e DBs), e as linhas pretas tracejadas são os limites mínimo e máximo das profundidades medidas com a haste graduada. O teste CT4 foi o que apresentou maior quantidade de dados espúrios, principalmente pelo feixe DB3, devido a sua proximidade das paredes e pelo feixe DB4 pela reflexão dos ecos secundários.

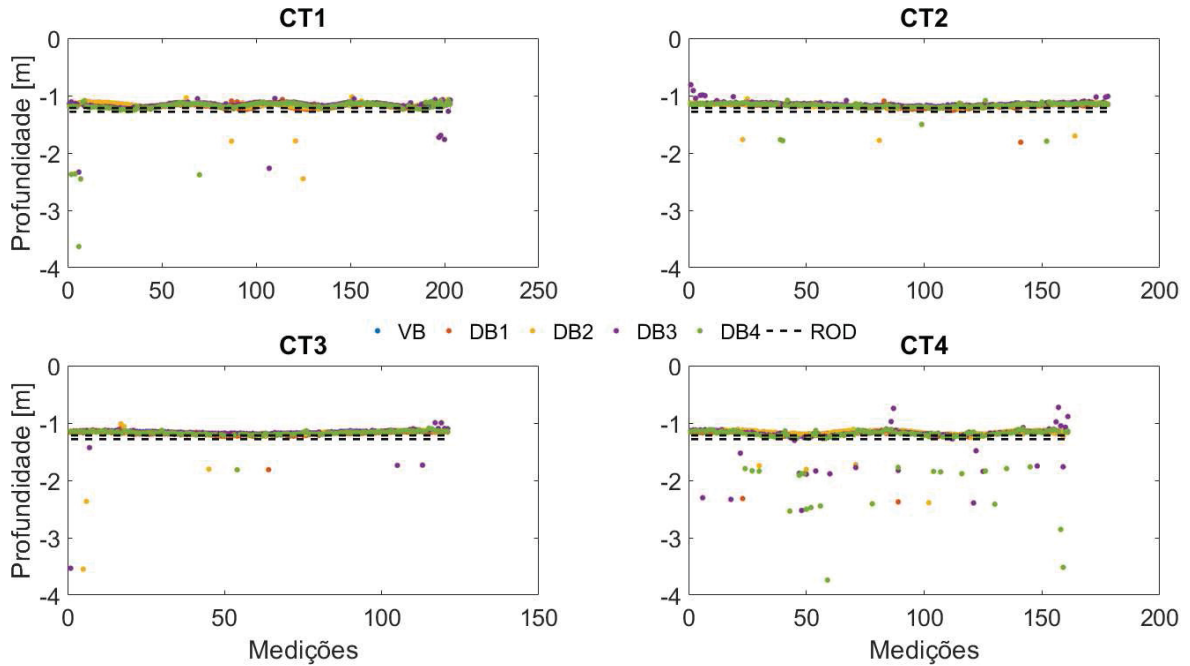


Figura 49 – Conjunto das profundidades brutas dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP representadas pelos pontos, e as profundidades mínima e máxima medidas com a haste graduada (ROD) representadas pelas linhas pretas tracejadas.

As medições com ADCP subestimaram a profundidade de referência (ROD) em 0,05 m até 0,08 m para o feixe vertical, e as profundidades obtidas pelos feixes Doppler apresentaram discrepâncias de 0,18 m a 2,5 m. O mesmo padrão foi observado por Kasvi et al. (2019), comparando um modelo de elevação baseado em dados ADCP com pontos de controle em uma seção no rio Pulmanki, com o resultado de que as profundidades ADCP foram inferiores aos valores de referência. O autor obteve uma correlação média de 97%, com discrepâncias residuais finais entre -0,24 m e +0,29 m.

Os dados brutos do ADCP mostram claramente pontos que podem ser considerados *outliers* e, portanto, devem ser eliminados para evitar uma subestimação ou superestimação da média amostral, como citado por Osborne e Overbay (2004). Dados de maior profundidade podem ter sido causados pela textura lisa do material da área de controle (o qual possui uma superfície plana e altamente reflexiva) que provavelmente introduz alguma contaminação dos lobos laterais devido ao ângulo dos feixes Doppler do ADCP. Segundo González-Castro e Muste (2007), os sinais dos feixes de ângulo a partir de 20° influenciam

em pelo menos 6% das medições de profundidade. Além disso, a interferência dos lóbulos laterais devido ao ângulo de inclinação na área muito próxima da parede coloca limitações na determinação das profundidades (MORLOCK, 1996).

Os erros grosseiros foram suavizados por uma técnica de regressão local robusta (equação 5.8 da seção 5.2.1.3), com uma janela de 5 amostras para determinar o valor mediano. A partir da mediana é considerado um valor válido, os dados entre 6 desvios absolutos da mediana. Após o processo de filtragem, a amplitude das profundidades reduziram e os valores mínimo e máximo foram de -0,9 e -1,26 m, respectivamente. Os pontos coloridos, na Figura 50, são as profundidades do ADCP filtradas e as linhas tracejadas em preto são os limites de profundidade medidos com a haste graduada (ROD). Ao contrário de todas as expectativas de que as medições com ADCP estivessem localizadas entre as linhas tracejadas, quase todos os dados do ADCP apresentam profundidades menores em relação ao limite mínimo da medição manual (ROD).

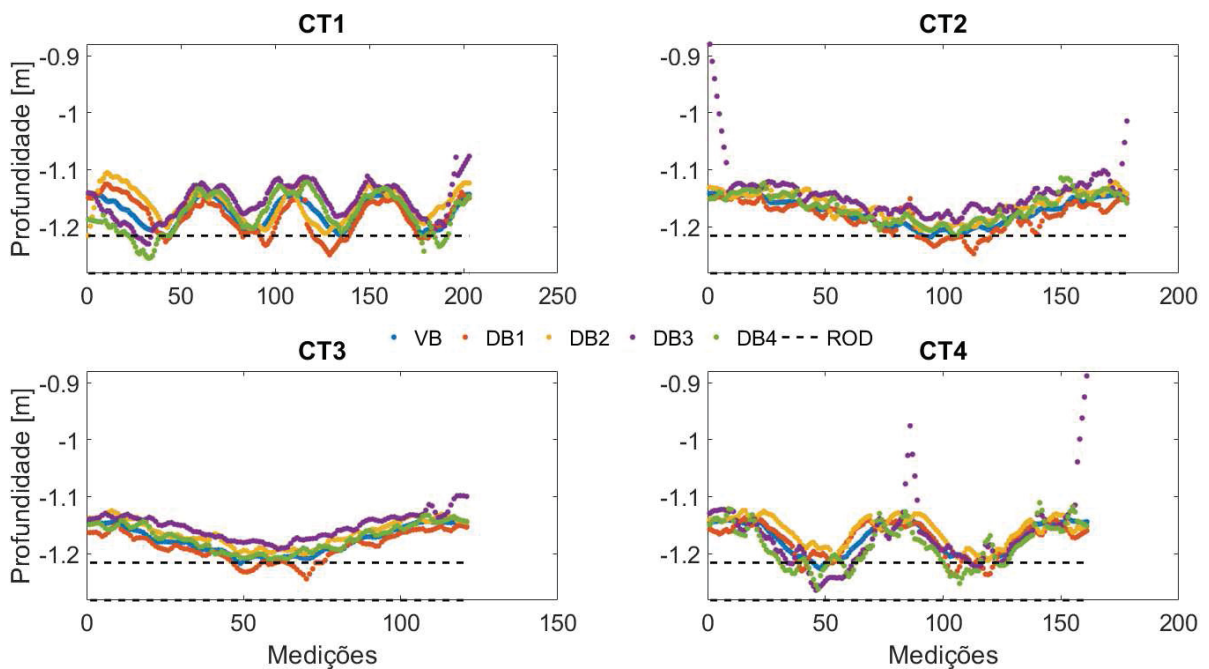


Figura 50 – Conjunto das profundidades suavizadas do ADCP (VB, DB1, DB2, DB3 e DB4) representada pelos pontos e as profundidades mínima e máxima medidas com a haste graduada (ROD) representada pelas linhas pretas tracejadas.

Os levantamentos do ADCP e do ROD foram traçados na Fig. 51 a partir de uma mesma coordenada planimétrica, onde os pontos em cinza representam as medições com a haste graduada (ROD) e aos pontos em azul mostram as medições com o ADCP (VB: gráficos superiores e DB: gráficos inferiores da figura 51). Pode ser observado um desvio entre o conjunto de dados ADCP e o ROD, variando entre 0,05 m e 0,09 m para o feixe vertical, e entre 0,008 m e 0,34 m para os feixes Doppler, considerando todos os testes executados. Os cálculos dos desníveis (ou seja, diferença entre as profundidades mínima

e máxima de todo o levantamento) foram de 0,08 m e 0,14 m, para os feixes vertical e Doppler, respectivamente. Discrepância de apenas 0,01 m quando confrontado com o desnível obtido com as medições manuais.

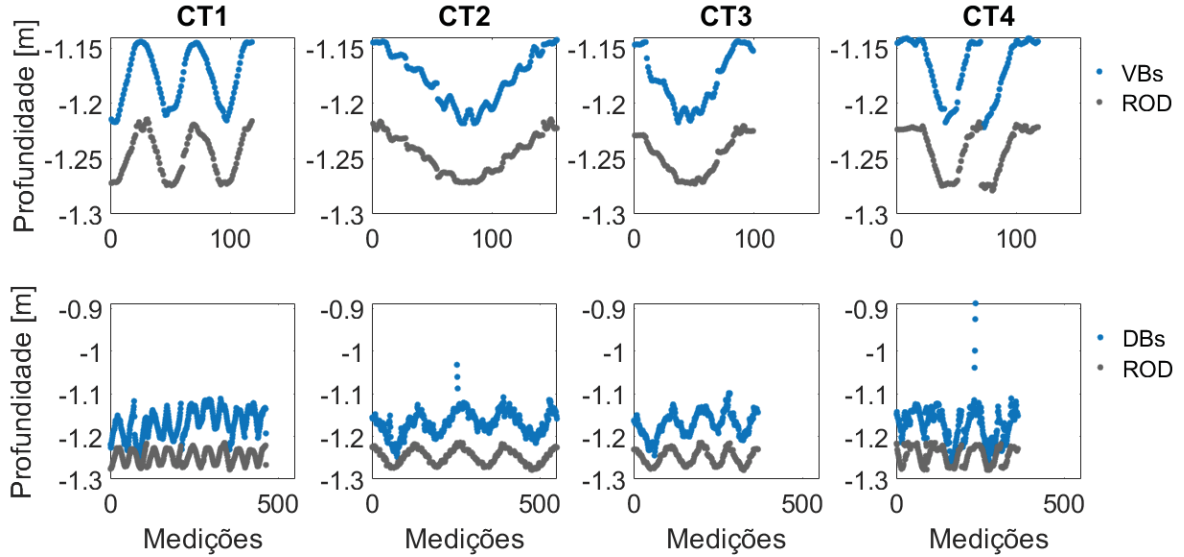


Figura 51 – Gráficos superiores: Profundidades manuais (ROD) representado pelos pontos em cinza e feixe vertical (VB) em azul. Gráficos inferiores: Profundidades manuais (ROD) representado pelos pontos em cinza e feixes inclinados (DB) em azul.

As medições com a haste apresentaram variações relativas semelhantes em comparação com o ADCP. Com exceção de medições nos testes CT2 e CT4, observando uma discrepância de até -0,88 m dos feixes Doppler. Devido a uma abundância de dados espúrios, mesmo quando filtrado os *outliers* não foram completamente eliminados. As profundidades dos feixes Doppler ainda permanecem superiores aos erros, máximo de 0,20 metros aceito pela ANA e, obtidos pelo cálculo referente a Ordem Especial das especificações técnicas da IHO.

A partir da necessidade de realizar um ajuste dos dados do ADCP, principalmente dos feixes Doppler, um modelo de regressão foi obtido utilizando as medições manuais (ROD) como valor de referência e os dados do ADCP de cada teste, onde os modelos para cada feixe (VB e DB) de cada cenário estão apresentados na figura 53. A correlação média dos quatro testes foi de 99% para o feixe vertical e de 89% para os feixes Doppler, em que os testes CT1 e CT4 apresentaram a correlação mais baixa com 86% para os feixes Doppler. Os modelos de regressão linear foram aplicados para ajustar o conjunto de dados de profundidade obtidos com o ADCP, o qual mostrou uma melhora na discrepância da amplitude de profundidade, reduzindo em média 1,3 m e 0,04 m, para os feixes Doppler e vertical, respectivamente.

Os picos observados nos dados dos feixes Doppler dos testes CT1 e CT4 foram ajustados pelos modelos de regressão, com o aumento da profundidade de -0,88 m para -1,1 m. Os resíduos também foram reduzidos pelos modelos, como observado nos histogramas

da Figura 52, onde os histogramas azul e laranja representando os dados brutos e suavizados, respectivamente, mostram diferenças maiores que aquelas permitidas pelas especificações técnicas vigentes.

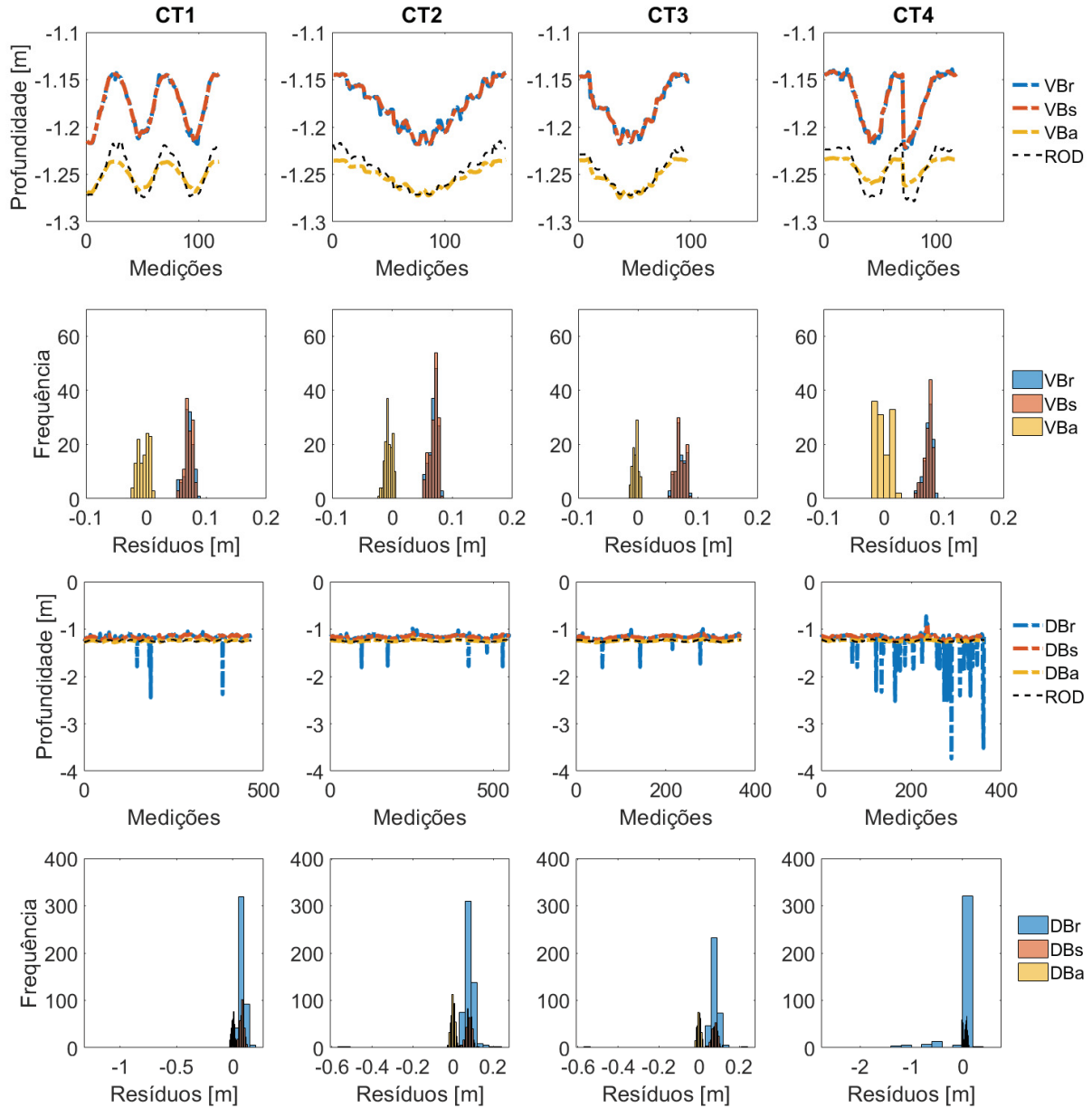


Figura 52 – Gráfico e histogramas das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP representadas pelas cores azul, laranja e amarelo, respectivamente; e as linhas tracejadas pretas representando as profundidades com a haste graduada (ROD).

Após o ajustamento, as discrepâncias foram inferiores a 0,10 m (histogramas em amarelo da Figura 52), conforme requerido pelas especificações técnicas da ANA e Ordem Especial da IHO. Da mesma forma, analisando os gráficos da figura 54, quando comparadas as medições com ADCP com os valores de incerteza vertical total da Ordem Especial da IHO representadas pelas linhas tracejadas pretas, verifica-se que todos os

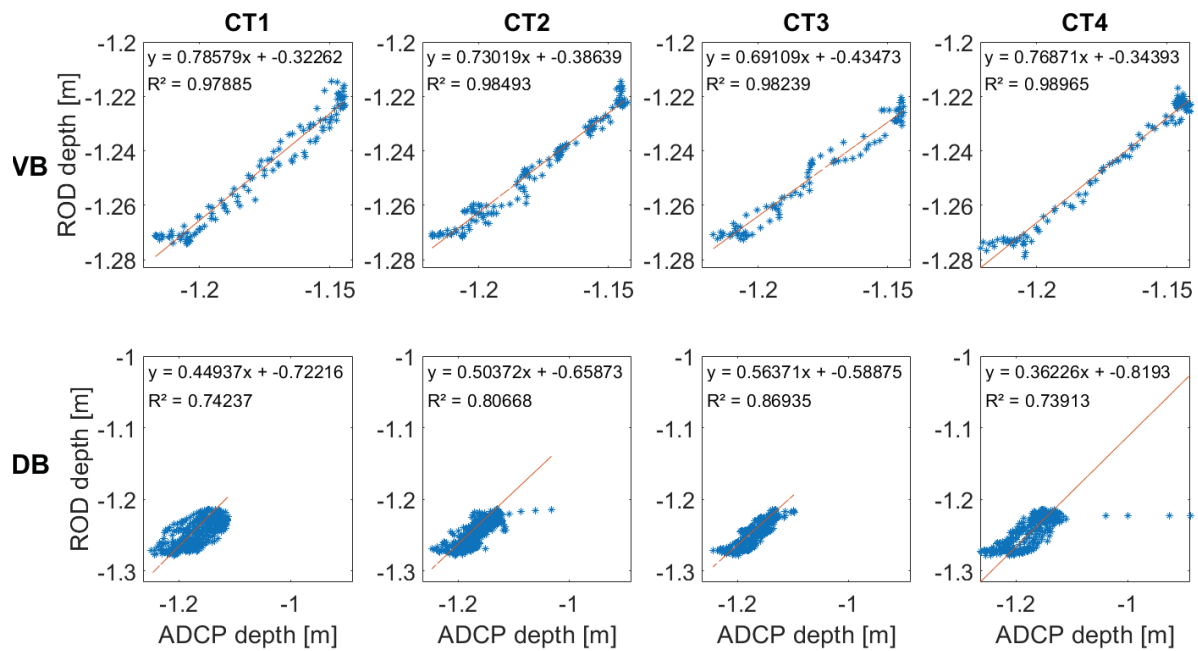


Figura 53 – Modelos de regressão linear gerados a partir das profundidades coletadas com a haste graduada (ROD) e ADCP, feixes vertical (VB: gráficos superiores) e Doppler (DB: gráficos inferiores); onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação do modelo.

testes apresentaram profundidades brutas dos feixes Doppler (linhas tracejadas em azul), acima do erro permitido.

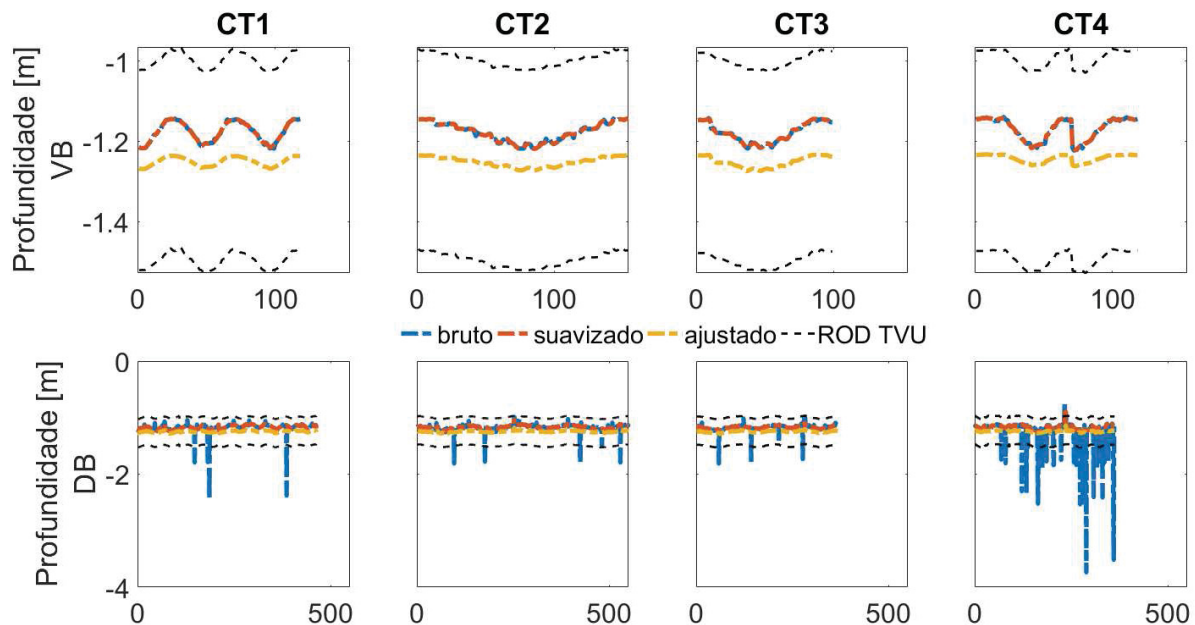


Figura 54 – Gráfico das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas dos feixes vertical (VB: gráficos superiores) e Doppler (DB: gráficos inferiores) do ADCP representadas pelas cores azul, laranjado e amarelo, respectivamente; e as linhas tracejadas pretas representando as incertezas verticais totais (ROD TVU) para cada testes e cada feixe.

O cálculo do volume apresentou uma melhora de 7% após o ajuste, onde o ADCP

atingiu 100% de representatividade para todos os testes. Apesar de uma porcentagem relativamente baixa de melhora, deve-se considerar o tamanho da área em questão, e que o processamento eliminou as medições espúrias e reduziu a amplitude da profundidade do ADCP, ou seja, diminuiu o intervalo entre os valores mínimo e máximo de profundidade. Em alguns casos, mesmo após o processo de suavização, o conjunto de dados continuou a apresentar profundidades espúrias devido ao maior número de medições com valores próximos, aumentando o valor da mediana e consequentemente aumentando a tolerância da filtragem.

O ajustamento dos dados do ADCP proporcionaram Modelos Digitais de Elevação mais próximos da realidade. Os resultados do processamento dos testes na área de controle, mostram que o ajuste pode ser usado para melhorar a representatividade do conjunto de dados de profundidade obtidos com o ADCP e obter informações mais confiáveis.

### 6.2.2.3 Área de controle - SBES x ADCP

Nesta etapa, o objetivo foi a comparação dos dados de profundidade do ADCP com o SBES, considerando o SBES validado a partir das medições manuais (ROD). Os dados suavizados do ADCP (VB e DB) e do SBES foram comparados nos mesmos pontos como ilustrado na Figura 55. As profundidades medidas com ambos os feixes do ADCP, vertical e Doppler, subestimaram em média de 0,07 m e 0,08 m, respectivamente, as profundidades do SBES. No entanto, todos os feixes do ADCP apresentaram o mesmo comportamento relativo ao SBES.

Os MDE's baseados nos feixes, vertical (VB) e Doppler (DB), do ADCP foram gerados a partir das profundidades suavizadas e calculado os resíduos sobre o conjunto de dados SBES. Os valores dos resíduos entre os feixes ADCP (vertical e Doppler) e SBES, variaram de -0,16 m a -0,06 m, apresentando uma distribuição quase gaussiana com uma média igual a -0,10 m. Apesar da Fig. 55 mostrar que as profundidades ADCP foram subestimadas em relação à profundidade SBES (entre -1,33 m e -1,23 m), o ADCP apresentou um comportamento muito semelhante às profundidades de referência.

Com a finalidade de verificar se existe uma diferença significativa entre ambas as técnicas (ADCP e SBES), o teste de hipótese de Wilcoxon (seção 5.2.1.3) foi realizado com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Quanto ao teste estatístico de hipóteses, todos os cenários apresentaram um valor p inferior a 0,05, rejeitando a hipótese  $H_0$  de que o conjunto de dados possui a mesma distribuição que o conjunto de dados do SBES. Assim, recomenda-se o ajuste de ambos os feixes (VB e DB).

O SBES utilizado nas técnicas convencionais apresentou uma discrepância de 2% em relação ao volume em comparação com as medições manuais. Os resultados dentro da imprecisão do equipamento confirmam a viabilidade de utilizá-lo como referência. Um



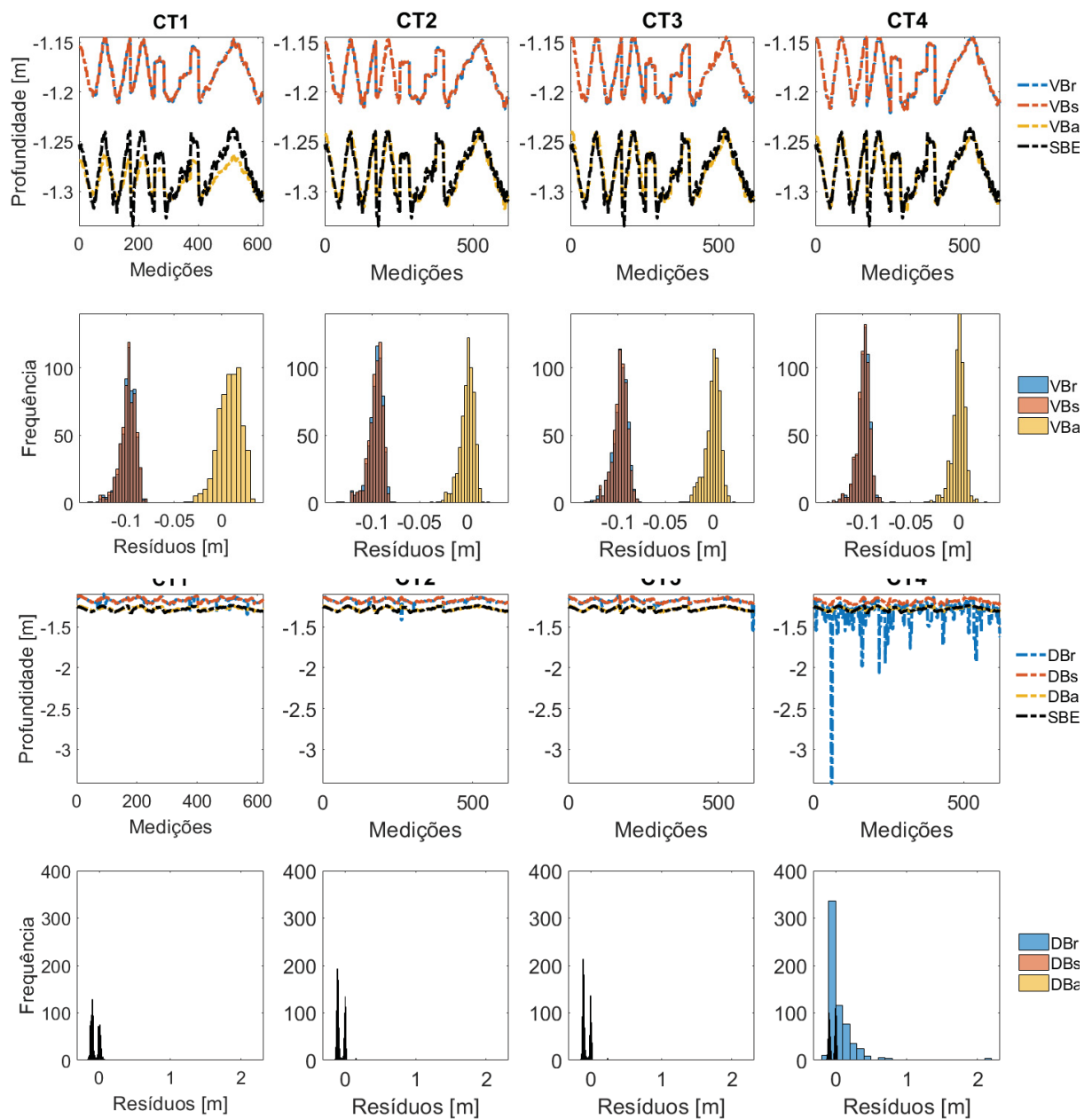


Figura 55 – Gráfico de profundidades do ADCP, representadas pelas linhas tracejadas azul (VB) e laranja (DB), e a linha preta os dados do SBES. Os histogramas em relação aos resíduos das profundidades do ADCP em relação ao SBES.

modelo de regressão linear a partir dos dados do SBES foi estabelecido para ajustar o conjunto de dados de profundidade do ADCP. Os modelos obtidos para cada cenário são expostos na Figura 56.

O coeficiente de determinação variou de 0,74 a 0,95, indicando uma boa correlação com os dados do SBES, em que a pior correlação de 86% foi observada no cenário CT1. O modelo de regressão linear do teste CT1 não variou para os feixes (vertical e Doppler). Entretanto, CT2, CT3 e CT4 apresentaram diferenças, concluindo que o melhor seria determinar um modelo para cada tipo de feixe (VB e DB). Esta evidência suporta o estudo



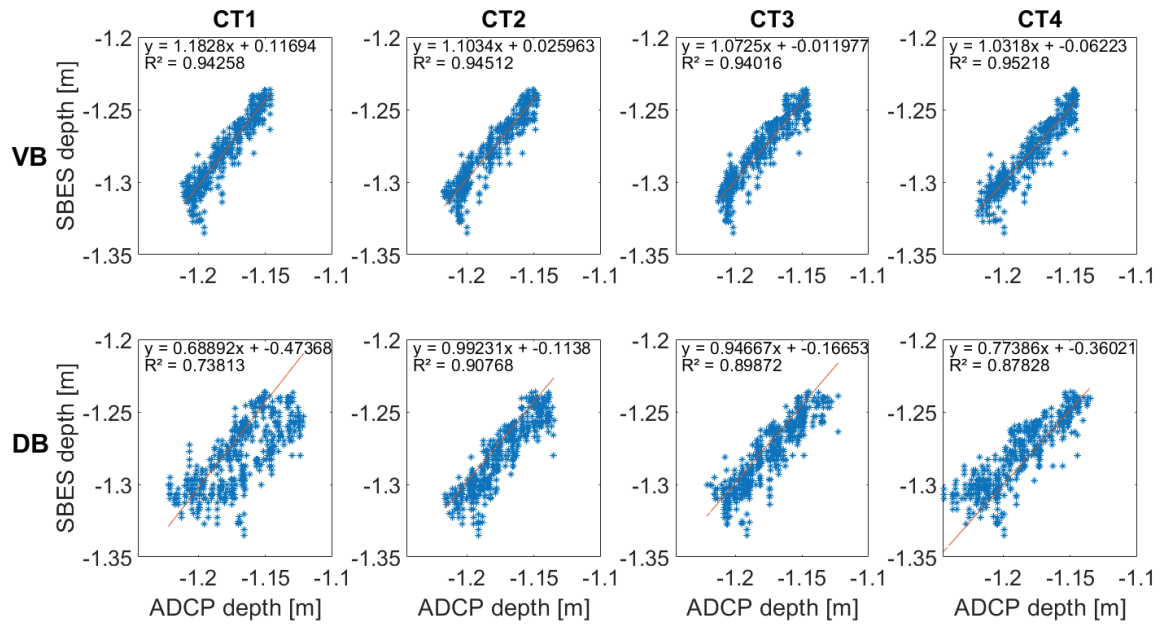


Figura 56 – Modelos de regressão linear gerados a partir das profundidades coletadas com o ecobatímetro monofeixe (SBES) e ADCP, feixes vertical (VB: gráficos superiores) e Doppler (DB: gráficos inferiores); onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação do modelo.

de Gonz'alez-Castro (Gonzalez-Castro2007) sobre a interferência do lóbulo lateral pelos sinais dos feixes de ângulo superior a  $20^\circ$  da posição vertical.

As profundidades e resíduos ADCP ajustados com relação ao SBES (Fig.55), forneceram informações na mesma posição para ambos os sensores, permitindo a comparação entre eles. Posteriormente, ADCP (VB e DB) e SBES mostraram informações de profundidade quase sobrepostas, com variação inferior a 0,05 metros entre os levantamentos. O teste de hipóteses do conjunto de dados pós-processados forneceu um valor p superior a 0,05. Aceita a hipótese  $H_0$ , assume-se que o conjunto de dados ADCP tem a mesma distribuição que a do SBES. Os dados pós-processados melhoraram o cálculo do volume até 8% para a área de controle. A amplitude de profundidade de 1,09 m para os dados brutos reduziram para 0,11 m nos dados ajustados. Consequentemente, o desvio padrão de 0,40 m para os dados brutos reduziu para 0,03 m os dados ajustados.

A discrepância da profundidade ajustada é consistente com a discrepância de 0,10 metros, entre o ROD e a SBES. Os dados brutos dos feixes Doppler mostraram resíduos de até 2,5 metros. Após o ajuste, utilizando uma técnica acústica (SBES), este valor diminuiu para 0,08 metros quando comparado ao método direto (ROD), exceto para o teste CT4 que apresentou resíduos de até 0,18 m. Entretanto, apenas 0,03% dos resíduos apresentaram valores superiores a 0,10 m. Houve melhora da qualidade dos dados de profundidade do ADCP, onde as discrepâncias obtidas foram inferiores a 0,20 metros.

A Agência Nacional da Água (ANA) fornece um valor de referência de até 0,20 m de erro de profundidade permitido, enquanto a Organização Hidrográfica Internacional

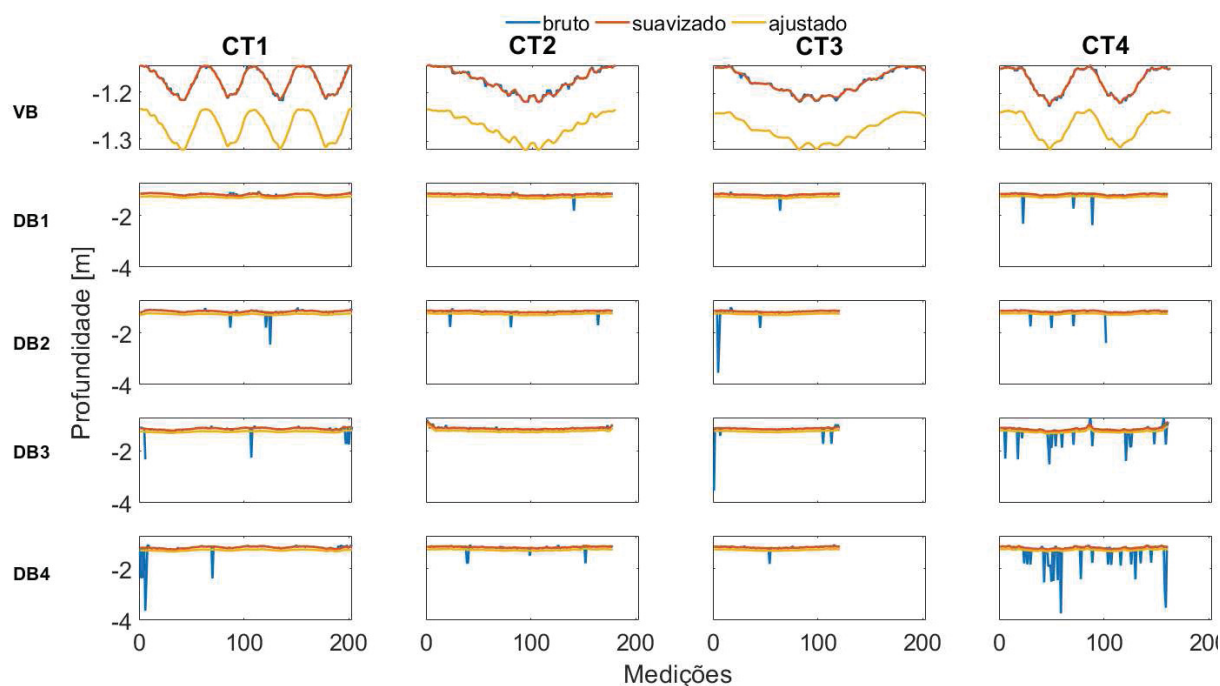


Figura 57 – Profundidades, bruta, suavizada e ajustada, do conjunto total de medições com os feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP.

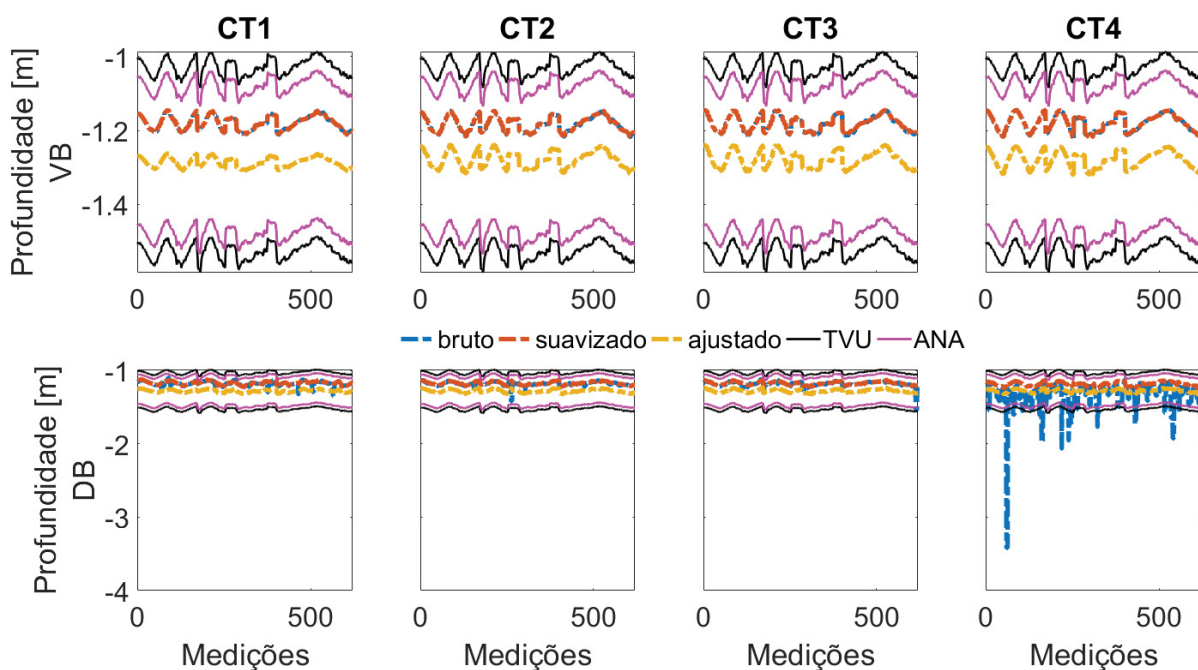


Figura 58 – Gráfico de profundidade, dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP, bruto, suavizado e ajustado; e tolerâncias de medições usando SBES de acordo com o cálculo da Ordem Especial seguindo as normas técnicas da IHO (TVU) e Agência Nacional de Águas (ANA).

(IHO) utiliza o cálculo da incerteza vertical total (TVU) que varia com a profundidade. As medidas brutas do ADCP apresentaram valores superiores aos erros permitidos, como visto na Fig. 58, onde a linha azul representa o conjunto de dados brutos do ADCP, e as linhas

tracejadas são as tolerâncias calculadas usando as medidas manuais (ROD). Entretanto, o conjunto de dados apresentou melhorias após o processamento das profundidades com erros dentro das tolerâncias, representadas pela linha amarela. Os resultados do processamento mostraram que os ADCPs poderiam ser usados para determinar a batimetria com uma qualidade compatível com aquela solicitada pelas normas técnicas da ANA e IHO, desde que as etapas de pós-processamento desenvolvida nesta pesquisa fossem realizadas.

Quando analisadas a distribuição espacial dos resíduos (Figuras 59 e 60) uma melhora significativa nos modelos é percebida. A Figura 59 mostra os resíduos do feixe vertical dos dados brutos, suavizados e ajustados do ADCP em relação ao SBES variando entre -0,13 m e 0,05 m. Após o ajustamento pelo modelo de regressão linear as discrepâncias não ultrapassaram 0,05 m em módulo.

Em relação aos feixes Doppler essa melhora foi ainda maior. Os dados brutos apresentavam variações de 2,3 m quando comparados com as profundidades do SBES, que pode ser visualizado mais claramente em diversos pontos no teste CT4 (Figura 60). O ajustamento reduziu esses resíduos para valores menores que 0,10 m em módulo, tornando 100% das medições com erros aceitáveis de acordo com as especificações técnicas.

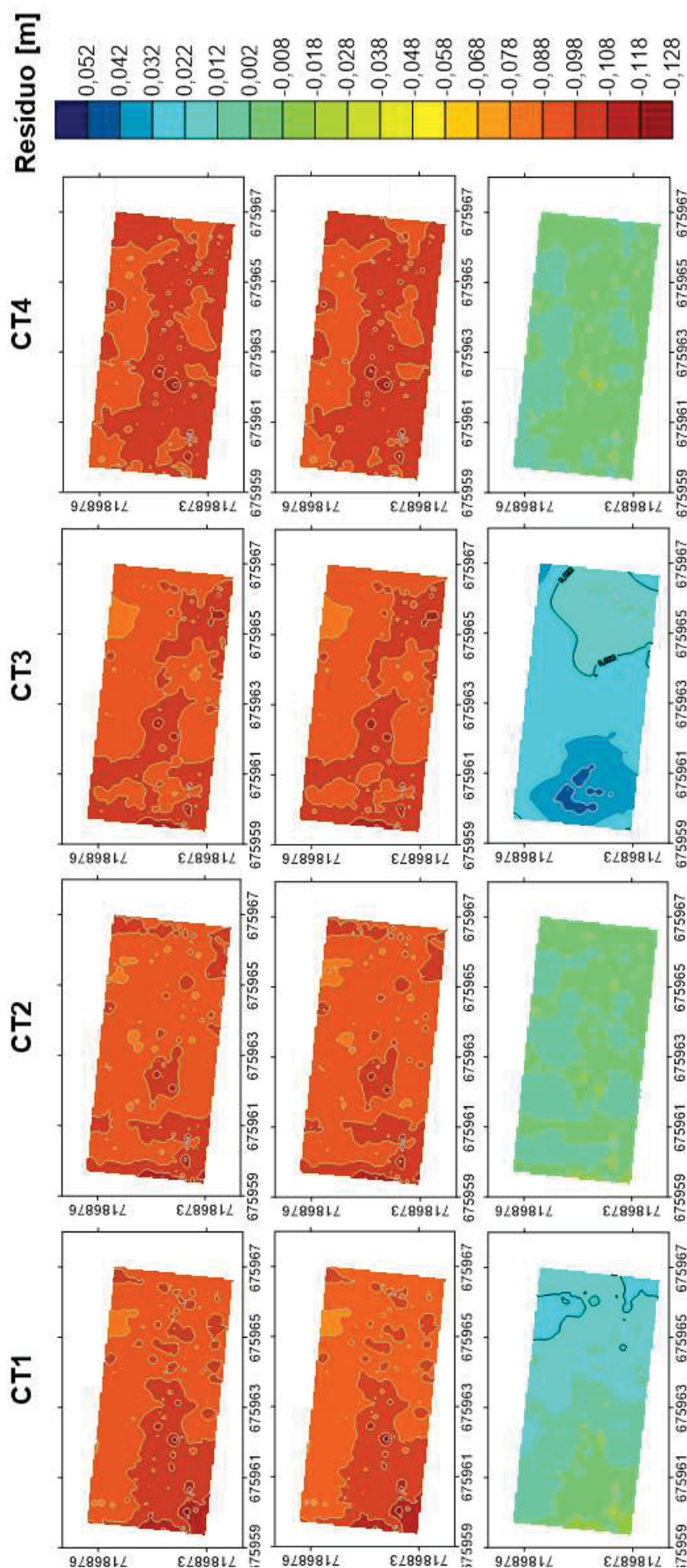


Figura 59 – Distribuição espacial dos resíduos dos dados bruto, suavizado e ajustado, do feixe vertical do ADCP em relação às medições com SBES para cada cenário (CT1, CT2, CT3 e CT4).



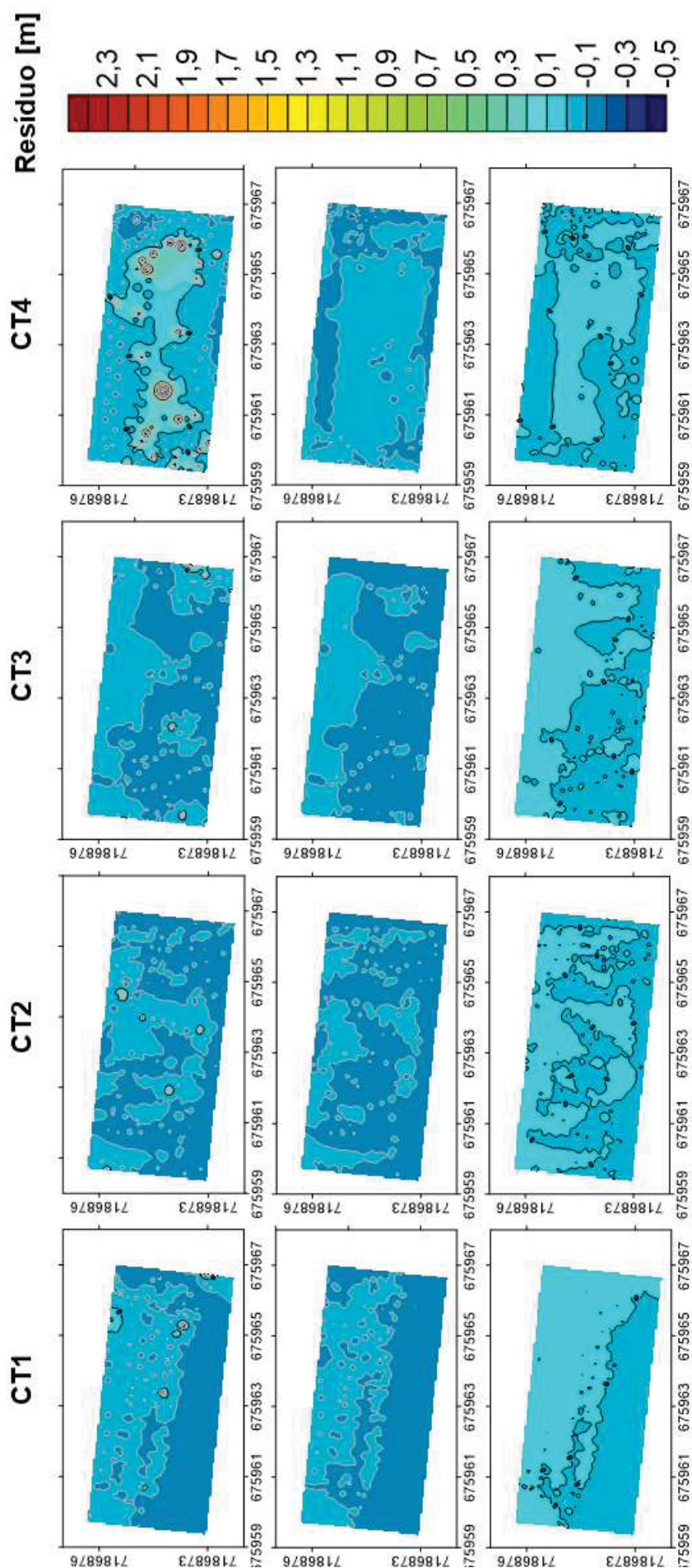


Figura 60 – Distribuição espacial dos resíduos dos dados bruto, suavizado e ajustado, dos feixes Doppler do ADCP em relação às medições com SBES para cada cenário (CT1, CT2, CT3 e CT4).

### 6.3 ESTUDO DE CASO: REGIÃO DO *BUFFER* DO RESERVATÓRIO PASSAÚNA

É interessante notar que os dados brutos (gráfico superior da Figura 61) obtidos no reservatório Passaúna não revelaram *outliers* quando confrontados com as medições na área de controle. As medições mais consistentes estão associadas a uma declividade mais suave das margens e às características de reflexão da superfície do sedimento (onde há maior absorção do sinal pelo material e dispersão do sinal em outras direções e somente parte desse sinal retorna ao transdutor). Diferentemente da área de controle, onde a superfície era extremamente reflexiva (no qual o material é plano e praticamente todo sinal é refletido), gerando reflexões secundárias (atingindo mais de uma vez o fundo antes do sinal retornar ao sensor). O desvio mediano absoluto (MAD) foi utilizado para remover os outliers do conjunto de dados brutos, resultando apenas numa ligeira diferença entre o conjunto de dados bruto e suavizado, como observado na Figura 61.

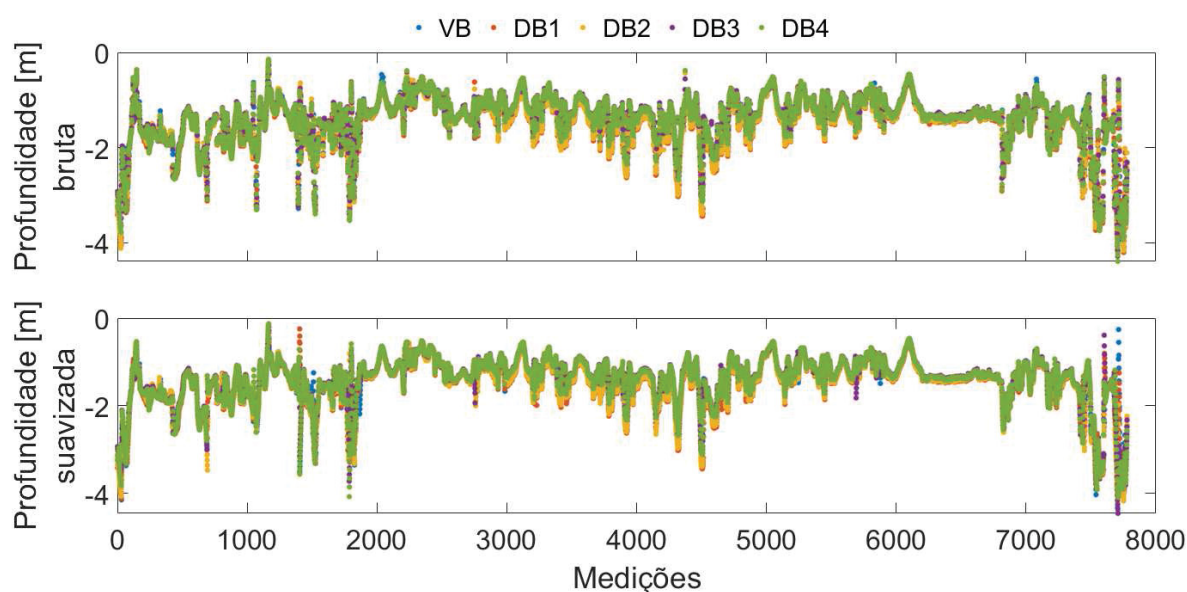


Figura 61 – Profundidades brutas (gráfico superior) e suavizadas (gráfico inferior), dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP.

Uma vez que o feixe vertical foi desenvolvido para a batimetria, as profundidades do DB seguindo a mesma distribuição do VB, indica evidências da consistência dessas medições. De acordo com os histogramas da Figura 62, esse padrão pode ser observado nos dados coletados com o ADCP no reservatório em que todos os feixes apresentam um comportamento similar ao VB. Evidentemente existe uma pequena variação entre as frequências considerando o ângulo de inclinação dos feixes laterais (Doppler) em relação ao feixe vertical. Consequentemente, cada feixe estará levantando profundidades em regiões próximas, porém distintas.

Semelhante à área de controle, no ambiente natural, os dados do ADCP subesti-

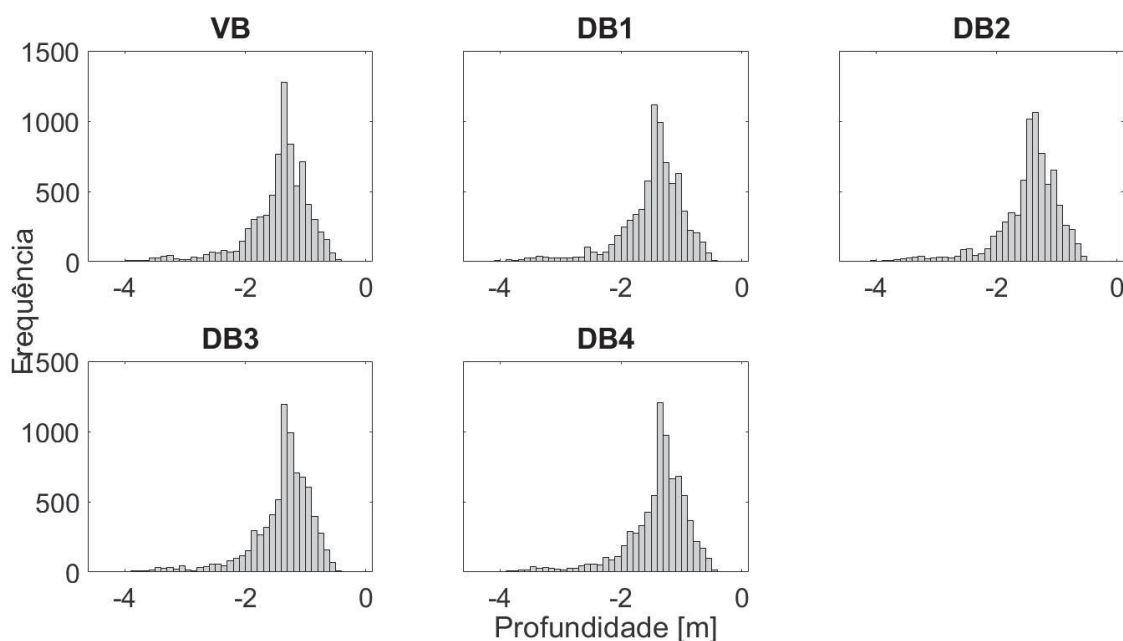


Figura 62 – Histograma das profundidades brutas, dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP coletadas na região do *buffer* no reservatório Passaúna.

maram os valores de profundidade quando comparados com o SBES (Figura 63). A linha contínua em preto representa o SBES, os pontos em azul representam o feixe vertical (VB) e os pontos vermelhos representam os feixes Doppler (DB). Embora o valor médio dos resíduos seja em torno de -0,49 m devido à subestimação da profundidade quando comparado com o SBES, as profundidades com o ADCP apresentam um comportamento quase gaussiano para ambos os feixes (VB e DB), indicado nos histogramas da Figura 63.

Conforme demonstrado na seção 6.2.2.3, as medições ajustadas do ADCP com o SBES corroboraram com as medidas obtidas com a haste graduada, mostrando que o SBES pode ser utilizado como referência para o ajustamento dos dados ADCP. Com o intuito de verificar se um mesmo modelo pode ser usado para o ajustamento de medições em diferentes ambientes, as profundidades de ADCP coletadas na região do *buffer* Passaúna foram ajustadas com os modelos de regressão linear da área de controle que apresentaram a correlação mais forte (para o VB - CT4 e DB - CT3, Figura 53, seção 6.2.2.3). O intervalo das profundidades ajustadas foi de 0,81 m a 2,5 m (Figura 64). Constata-se que esse intervalo de profundidades sofreu um aumento dos valores, mas ainda foram subestimadas em relação daqueles obtidos com o SBES.

Os RMSE foram de 0,47 m (VB) e 0,49 m (DB) considerando a profundidade do SBES como valor verdadeiro. Apesar dos desvios padrão dos resíduos serem baixos, 0,19 m e 0,22 m para os feixes vertical e Doppler, respectivamente, os valores dos resíduos absolutos se encontraram entre -2,16 m e 1,33 m para o VB e para o DB entre -2,33 m e 0,88 m (Figura 65). Em relação ao teste de Wilcoxon, mesmo após o ajustamento dos dados, o conjunto apresentou diferença significativa com valores de  $p$  igual a zero e  $h$  igual



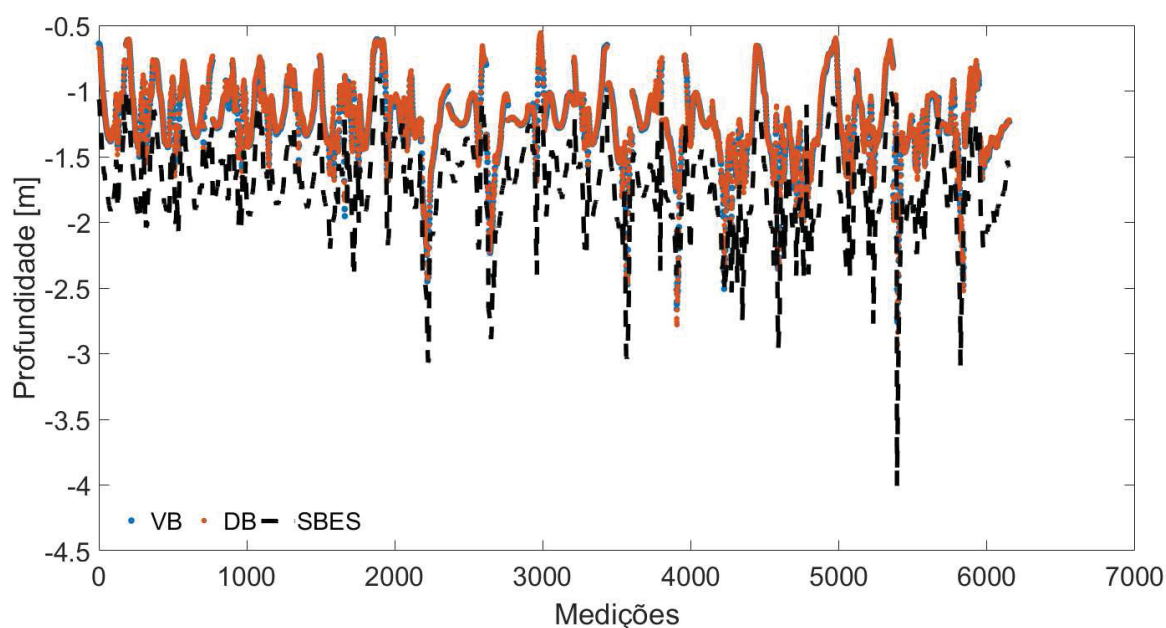


Figura 63 – Gráfico: Profundidades coletadas no reservatório Passaúna com SBES (linha tracejada preta) e feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP. Histogramas à esquerda: frequência dos resíduos das profundidades coletadas com o feixe vertical (VB) do ADCP em relação às medições com SBES.

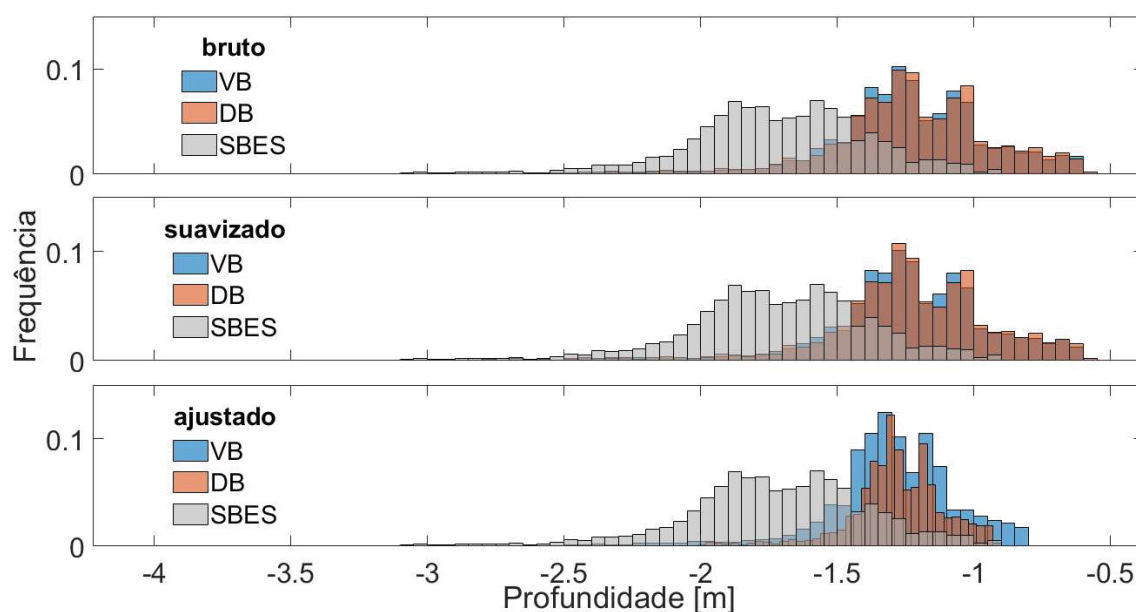


Figura 64 – Histograma das profundidades do SBES e dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP (profundidades bruta, suavizada e ajustada pelo modelo obtido na área de controle).

a 1 para ambos os feixes, indicativo de que os modelos obtidos na área de controle não são eficientes na correção das profundidades coletadas no reservatório Passaúna.

Os histogramas da Figura 66 corroboram com os resultados estatísticos, os quais mostram que mesmo após o ajustamento usando o modelo da área de controle a média

dos resíduos foi de aproximadamente  $-0,50$  m, ou seja, ainda existem discrepâncias maiores que as permitidas pelas especificações técnicas. O MDE obtido com o conjunto de dados ADCP ajustado com os modelos adquiridos na área de controle forneceu um volume de  $221.649 \text{ m}^3$ , proporcionando uma diferença de  $75.836 \text{ m}^3$ , aproximadamente 25% a menos do volume total, em relação ao SBES.

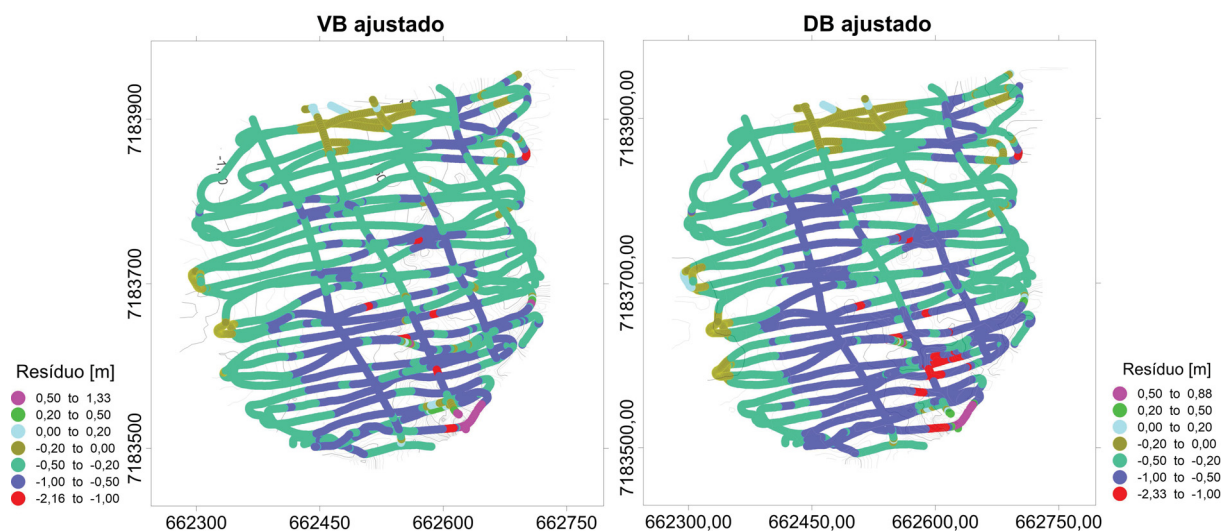


Figura 65 – Distribuição espacial dos resíduos entre MDE das profundidades dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) ajustadas pelo modelo obtido na área de controle e os dados coletados com SBES.

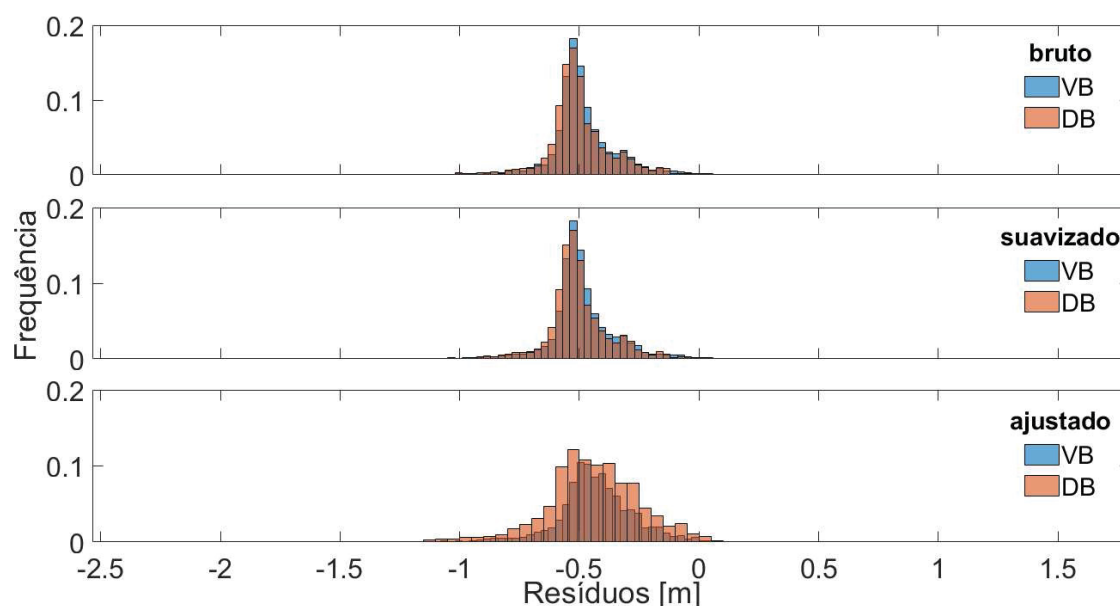


Figura 66 – Histograma dos resíduos dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) do ADCP (dados bruto, suavizado e ajustado em relação ao SBES).

Os parâmetros de qualidade do posicionamento podem ser uma justificativa do alto resíduo em relação ao MDE de referência, uma vez que diferentes métodos foram aplicados para os levantamentos com o ADCP e SBES. Nesse sentido, foram espacializados

os valores de HDOP, número de satélites e método do posicionamento disponibilizados no *software HydroSurveyor* pelo GPS Hemisphere. Na Figura 67 estão plotados o número de satélites observados durante o levantamento, o método de posicionamento e o valor da diluição da precisão horizontal (HDOP). A respeito da área interpolada (em cinza) na Figura 67, mais de 95% dos parâmetros apresentaram valores dentro daqueles exigidos pelas especificações técnicas, com a observação simultânea de pelo menos 5 satélites e HDOP menor que 6, como indicado nos histogramas da Figura 67.

Alguns pontos indicam a observação de zero satélites (pontos em vermelho), caracterizando uma área de grande obstrução devido à uma ponte existente na parte sudeste da área de estudo. Nessa região as coordenadas foram determinadas pela função *Bottom Track* do ADCP, mostrando uma das vantagens desse equipamento. No restante do levantamento os métodos de posicionamento DGPS e RTK foram aplicados na determinação das coordenadas, com predominância do método RTK em mais de 90% do conjunto de dados.

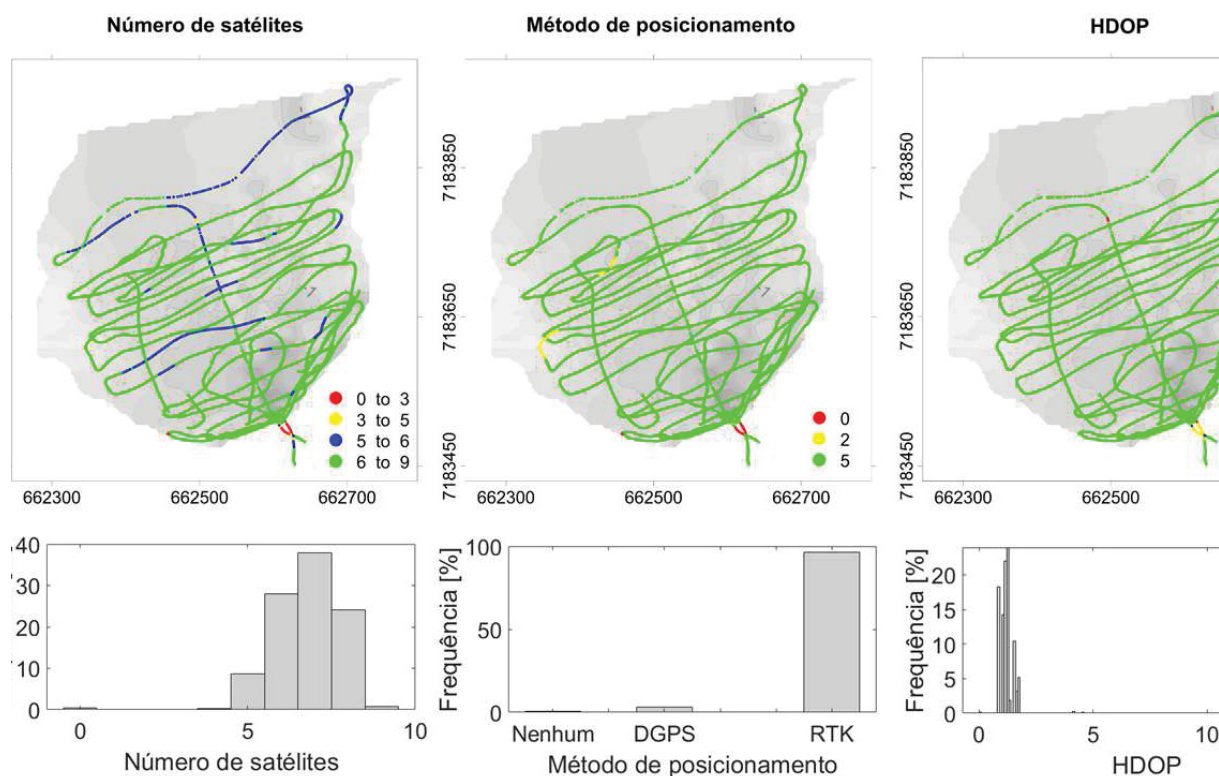


Figura 67 – Distribuição espacial e histograma dos parâmetros de qualidade do posicionamento planimétrico disponibilizado pelo GPS Hemisphere. Onde a qualidade do posicionamento se refere ao método utilizado no momento do levantamento, sendo 0 nenhum, 2 DGPS, e 5 RTK.

De acordo com as normas vigentes da ANA e IHO, existe um limite de erro permitido. Os cálculos foram feitos usando as profundidades coletadas com SBES como profundidade de referência seguindo as orientações de cada órgão, e plotados na Figura 72. Nota-se uma sobreposição entre as linhas tracejadas azul e vermelha, que representam o conjunto de dados bruto e suavizado, respectivamente. A linha amarela sofreu um pequeno

deslocamento em relação as demais linhas, mostrando um aumento das profundidades após o processamento dos dados. Porém, todas as três linhas citadas, se encontram acima dos limites permitidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) e da incerteza vertical total (TVU) usada pela Marinha do Brasil.

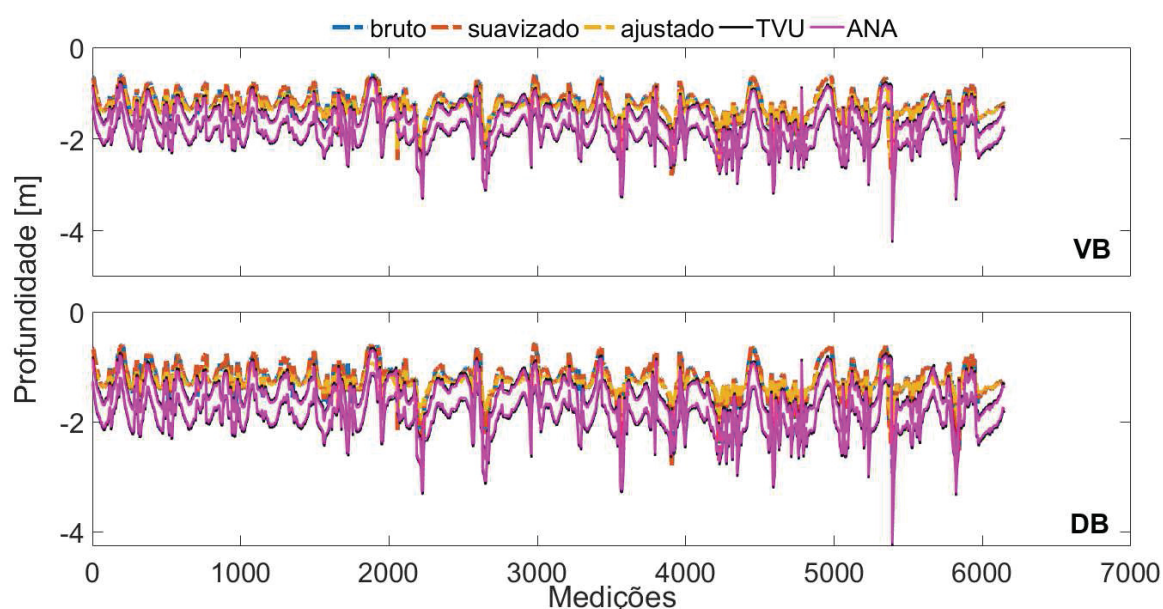


Figura 68 – Gráficos dos feixes vertical (gráfico superior) e Doppler (gráfico inferior) das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas pelo modelo obtido na área de controle, em relação aos erros permitidos pela ANA representada pelas linhas magentas e IHO representada pelas linhas pretas.

De modo a confirmar se o modelo gerado na área de controle pode ou não ser utilizado para diferentes cenários, um novo modelo de regressão linear para os feixes vertical e Doppler (Figura 69) foram gerados. Utilizando os dados, do ADCP e SBES, coletados na região do *buffer* do reservatório Passaúna para posterior comparação dos resultados. Em ambiente natural os dados não parecem apresentar uma grande diferença entre os feixes, uma vez que as equações para os feixes VB e DB foram muito semelhantes (Figura 69). Contudo, o teste de Wilcoxon mostrou que existe uma diferença significativa, apresentando valores de  $p$  iguais a zero, a um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Analisando os feixes separadamente, a correlação com o SBES foi de 93%, tanto do feixe vertical quanto para o Doppler, concluindo que este modelo pode ser utilizado para ajustar os dados do ADCP.

Os histogramas na Figura 70 mostram um comportamento similar de todos os feixes, com uma distribuição quase gaussiana, onde o conjunto de dados brutos e suavizados subestimaram as medições com SBES. Porém, com o pós-processamento, os intervalos das profundidades do ADCP e do SBES foram praticamente os mesmos. Os histogramas dos resíduos na Figura 71 indicam um deslocamento negativo dos conjuntos bruto e suavizado do ADCP em relação ao SBES, corroborando com a afirmação anterior de que



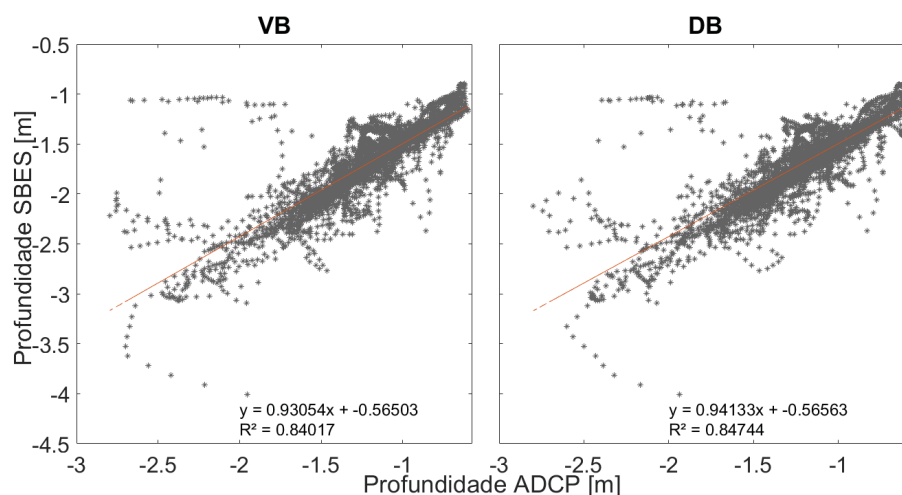


Figura 69 – Modelos de regressão linear para os feixes vertical (VB) e Doppler (DB) em relação às medições com SBES.

as profundidades foram subestimadas. Após o ajustamento verifica-se uma melhora do conjunto de dados do ADCP onde a média dos resíduos se encontra próxima a zero para ambos os feixes.

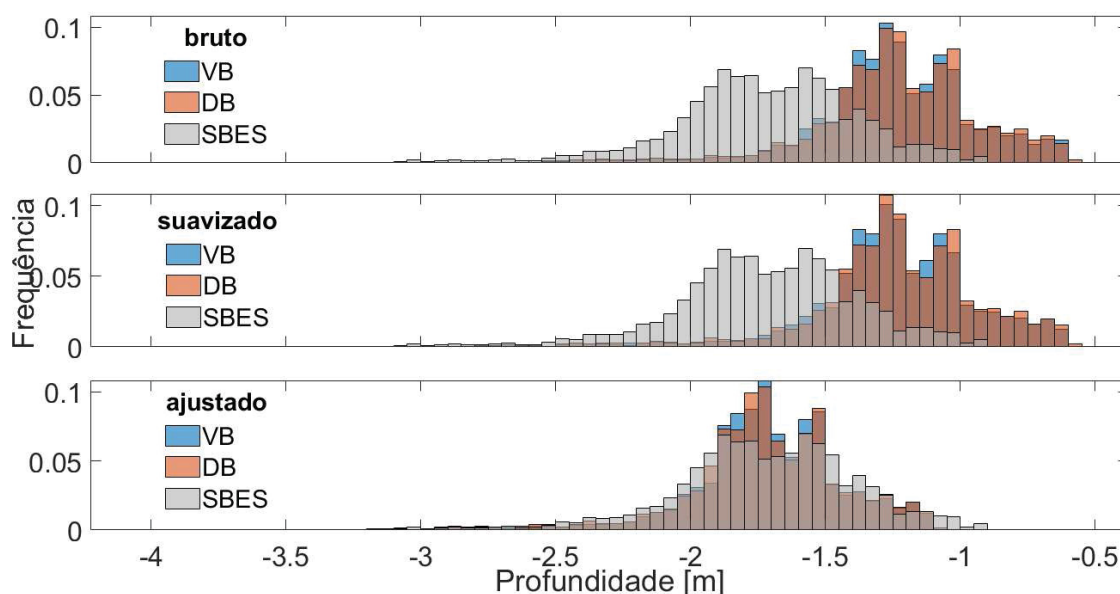


Figura 70 – Histograma das profundidades do SBES e dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) do ADCP.

A qualidade do processamento dos dados usando os modelos gerados com os dados do Passaúna foram comparados com os erros calculados pelas normas da ANA e IHO, indicado na Figura 72. Os gráficos mostram que o conjunto de dados brutos e até mesmo suavizados estão posicionados fora dos intervalos permitidos. O ajustamento proporcionou resultados dentro do intervalo considerado válido na maioria dos dados. Em concordância com as especificações técnicas da IHO, aproximadamente 17,7% dos dados do ADCP (VB+DB) permaneceram acima do erro calculado usando as medidas com

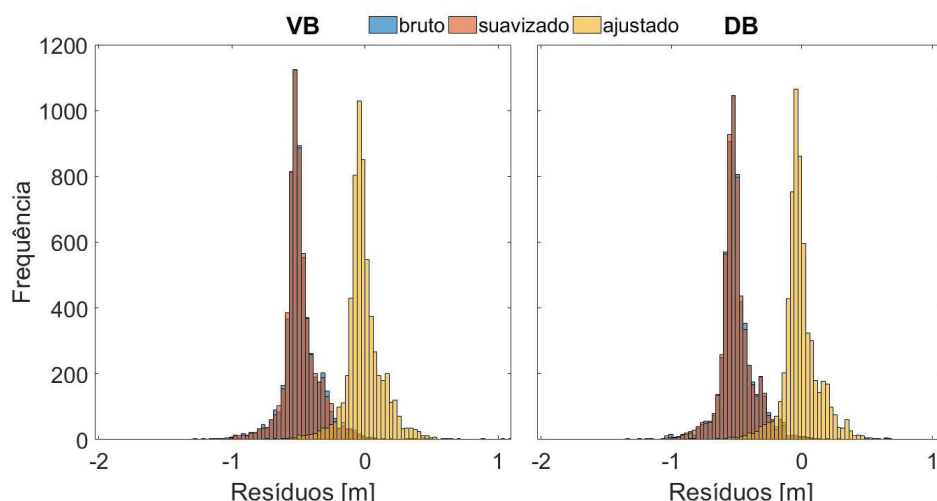


Figura 71 – Histograma dos resíduos das profundidades dos feixes vertical (VB) e Doppler (DB) em relação às medições com SBES.

SBES após o ajustamento. Se tratando das orientações da ANA, as porcentagens fora do intervalo permitido foi de 21%. O método de posicionamento usado para determinar as coordenadas do SBES foi o método absoluto, levando a crer que os altos resíduos podem estar associados aos diferentes métodos de posicionamento empregados no instante da tomada da profundidade aplicados para o SBES e ADCP.

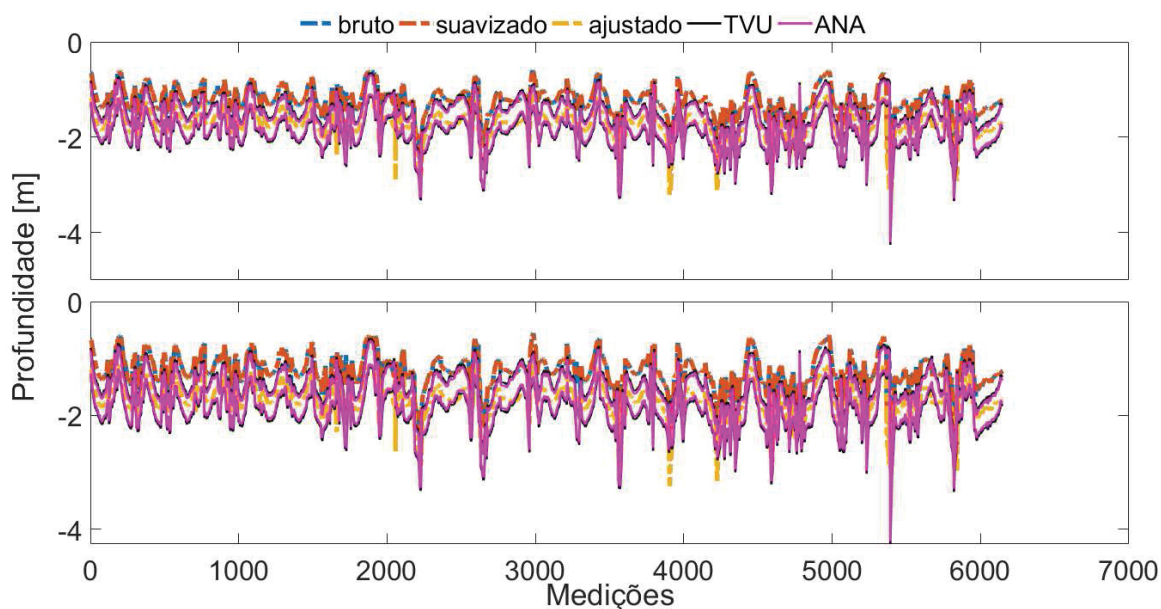


Figura 72 – Gráficos dos feixes vertical (gráfico superior) e Doppler (gráfico inferior) das profundidades brutas, suavizadas e ajustadas em relação aos erros permitidos pela ANA representada pelas linhas magentas e IHO representada pelas linhas pretas.

Observando os histogramas do conjunto total dos dados de profundidade de cada feixe separadamente (Figura 73) é possível identificar semelhanças entre o conjunto ajustado do ADCP e o SBES, os quais se sobrepõem e possuem praticamente o mesmo intervalo

após o pós-processamento. As linhas magentas indicam o intervalo de profundidades aceitas pela ANA e as linhas pretas pela IHO.

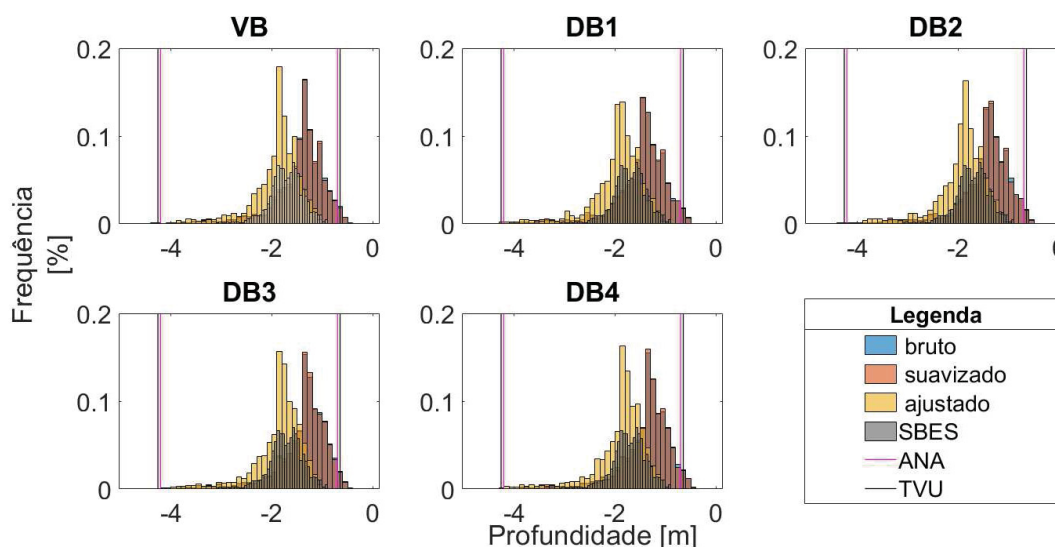


Figura 73 – Histograma separado por feixe, vertical (VB) e Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4), do ADCP do ADCP confrontando os dados do SBES, onde as linhas verticais representam as profundidades mínima e máxima aceitas de acordo com as normas da ANA (linhas em magenta) e IHO (TVU - linhas em preto).

A partir dos MDE's suavizado e ajustado (aplicando o modelo de regressão linear com os dados obtidos na região do *buffer*), mostram que o processo de suavização proporcionou uma pequena alteração na superfície de fundo (Figura 74), embora ainda seja possível ver algumas variações de cor no lado direito da área de estudo entre o ADCP e SBES. Após o ajustamento, são visualizadas semelhanças claras entre SBES e os dados ajustados dos DEM's ADCP. O pós-processamento não alterou o valor do desvio padrão da profundidade, contudo o RMSE passou de 0,52 m para 0,18 m, e o erro médio absoluto reduziu de 0,49 m para 0,002 m.

O cálculo do volume utilizando o ADCP (dados brutos, filtrados e ajustados) é apresentado na tabela 16, onde também são mostradas diferenças em relação aos dados baseados no MDE com SBES (uma vez que se trata do equipamento clássico para aquisição de profundidade). O MDE gerado pelos dados brutos subestimou o volume em 30% quando comparado com os dados baseados no SBES. Depois de remover os *outliers* pelo processo de filtragem, a diferença ainda foi de 28% do volume SBES.

As disparidades estão relacionadas com tipo de sensor e suas respectivas precisões. Outro ponto a considerar é o número de pontos de amostragem que os sensores são capazes de obter durante o mesmo intervalo de tempo. O ADCP possui 5 feixes, revelando uma superfície de fundo mais detalhada do que aquele usando o SBES (Figura 74). A subestimação da profundidade também foi observada por Kasvi et al. (2019), indicando que parte do erro pode estar associado à incerteza do sensor. É quase impossível identificar



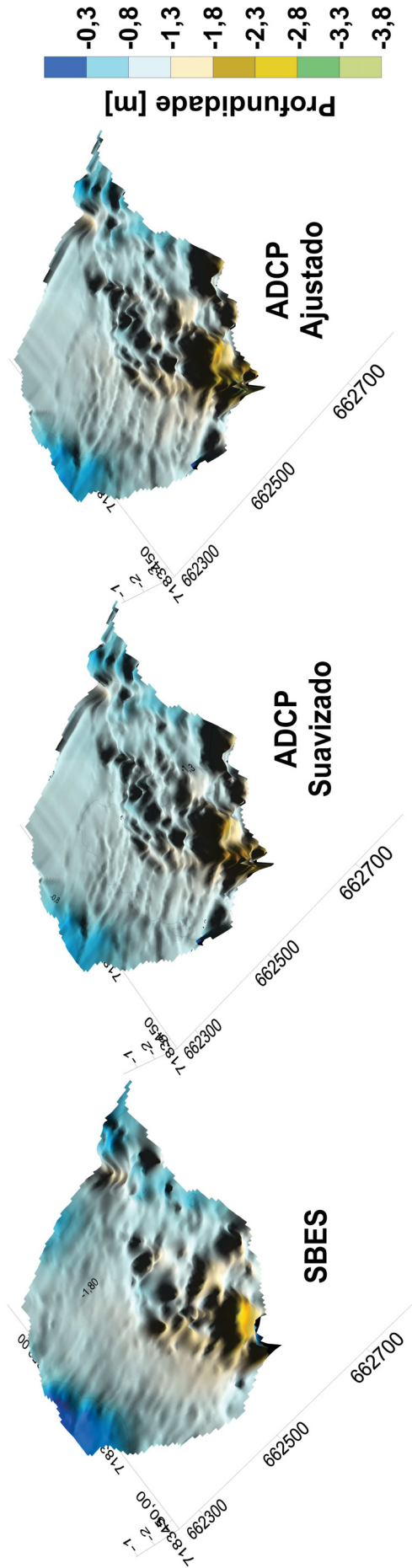


Figura 74 – Modelo Digital de Elevação dos dados, suavizados e ajustados, do SBES e ADCP.

todas as fontes de erro, no entanto, esta discrepância reduziu de 30% para 0,33% após o ajustamento (Tabela 16).

Ao comparar os resultados da aplicação do modelo obtido na área de controle e usando os dados coletados no Passaúna, observa-se que o modelo da área de controle não conseguiu representar a área de interesse dentro do erro permitido pelas normas vigentes. Apesar dos desvios padrão terem sido menores que o ajustamento com dados do reservatório, o erro médio quadrático atingiu 0,49 m. Acredita-se que os erros ainda persistiram ao aplicar o modelo da área de controle devido a discrepância nas características da área em que o modelo foi baseado e na região em que foi aplicada. Em que as profundidades do reservatório eram muito maiores do que da área de controle, adicionalmente o tipo de superfície de fundo também era extremamente diferente daquela considerada no modelo. De forma geral, o estudo de caso mostrou que as etapas de processamento desenvolvidas nesta pesquisa usando os dados da própria área de interesse melhorou o conjunto de dados de profundidade oriundos do ADCP, provando o seu desempenho.

Tabela 16 – Volume calculado para cada feixe do ADCP, feixe vertical e Doppler, e suas discrepâncias em relação ao volume de referência obtido com o SBES.

Sensor	Tipo	V [ $m^3$ ]	$\Delta V$ [ $m^3$ ]	$\Delta V$ [%]
SBES	suavizado	297186,93	-	-
	bruto	213214,6	83972,3	-28,3
VB	suavizado	213694,1	83492,9	-39,2
	ajustado AC	223914,8	73272,1	-24,7
	ajustado P	296515,5	671,4	-0,3
DB	bruto	211099,7	86087,3	-38,4
	suavizado	211258,6	85928,4	-40,7
	ajustado AC	221259,9	75927,0	-25,6
	ajustado P	296557,6	629,3	-0,3
VB + DB	ajustado AC	221648,5	75538,4	-25,5
	ajustado P	296522,4	664,6	-0,3

Tabela 17 – Resumo comparativo dos valores de profundidade mínimo, máximo, desvio padrão e erro médio quadrático, em metros, dos feixes vertical e Doppler do ADCP e SBES. O volume dos dados do ADCP ajustados com os modelos de regressão linear obtidos na área de controle (MRL AC) confrontando os modelos usando os dados coletados *in situ* (MRL P).

	MRL AC		MRL P		SBES
	VB	DB	VB	DB	
Min	0,806	0,912	1,103	1,085	0,899
max	2,493	2,166	3,211	3,243	4,007
std	0,239	0,175	0,299	0,301	0,035
RMSE	0,46	0,49	0,19	0,18	-

Com respeito à aplicação dos modelos gerados na área de controle, a diferença de 25% em volume entre os modelos ADCP e SBES (referência) mostrou que o comportamento

do ADCP pode variar de acordo com as características de cada região (por exemplo, profundidade e tipo de sedimento). Onde foi observada uma grande variação entre os modelos, devido ao material de fundo que proporciona um comportamento diferente de reflexão do sinal. O modelo usando um ecobatímetro monofeixe na área de interesse para ajustar o conjunto de dados ADCP foi necessário para obter resultados de qualidade. O que justifica a inviabilidade de usar os modelos obtidos na área de controle se deve as características extremamente diferentes dos ambientes naturais onde os levantamentos batimétricos são normalmente executados.

## 6.4 APLICAÇÃO: RIO TAQUARI

Os dados de profundidade coletados com o conjunto M9 da SonTek seguiram a trajetória descrita na Figura 28. Os levantamentos batimétricos foram realizados em dois dias consecutivos (01-02-2018 e 02-02-2018) apresentando profundidades de até 6 metros. Analisando a Figura 75, observa-se a presença de pontos isolados do restante do conjunto de dados em ambas as campanhas, um indicativo de dados espúrios.

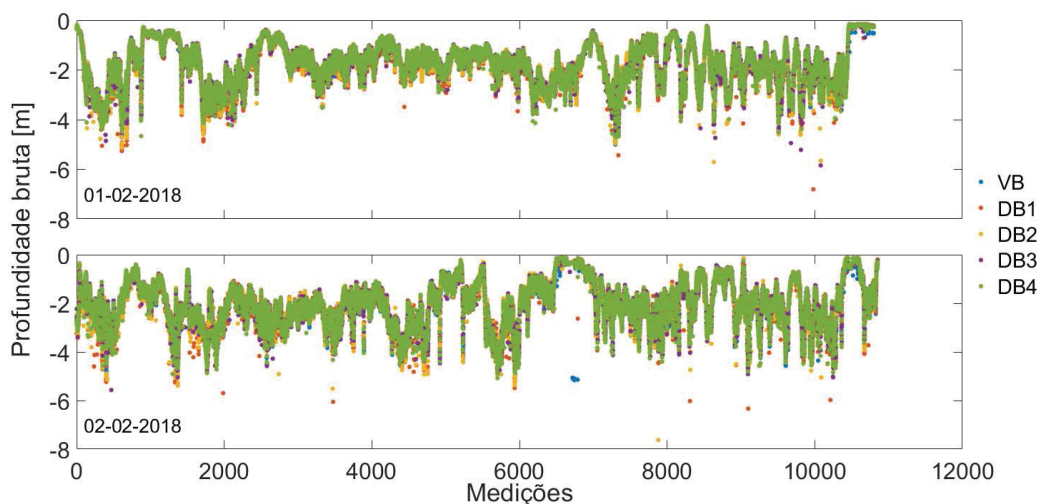


Figura 75 – Profundidades brutas para os dois dias de levantamento.

Para minimizar a influência desses dados foi aplicada uma suavização de acordo com as etapas de pós-processamento descritas na seção 5.2.1.3, proporcionando conjuntos de dados mais homogêneos (Figura 76) .

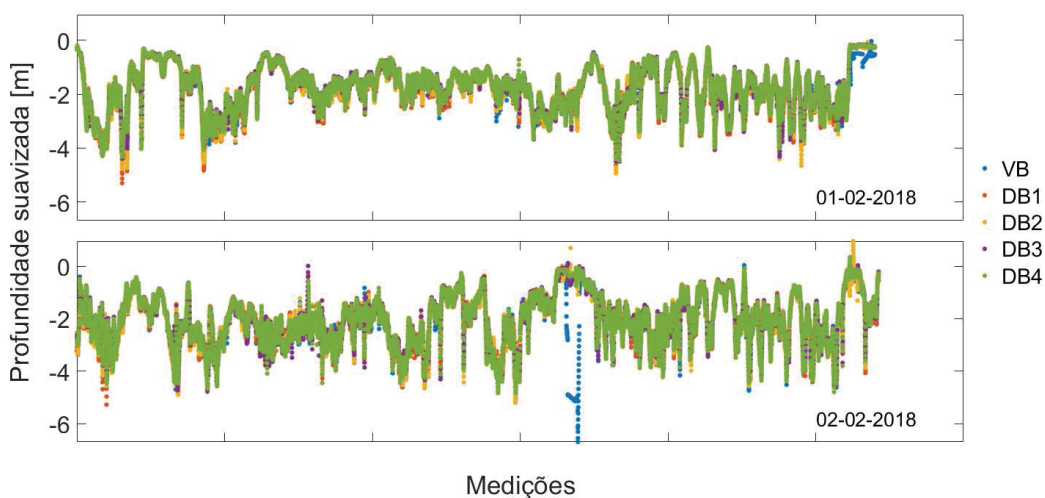


Figura 76 – Profundidades suavizadas para os dois dias de levantamento.

Tanto os dados brutos e suavizados mostraram comportamentos semelhantes se tratando da distribuição de frequências (Figura 77). No primeiro dia de campanha, a

distribuição dos feixes Doppler (DB1, DB2, DB3 e DB4) foram muito similares à do feixe vertical, com maiores frequências em 2 metros de profundidade. Porém as profundidades no segundo dia de campanha (Figura 78), mostraram uma região com aproximadamente 25 medições com o VB mais profundas do que o restante. O grande número de observações com o mesmo padrão deve ser considerado, indicando uma profundidade realmente maior e justificando a suavização do gráfico inferior da Figura 76.

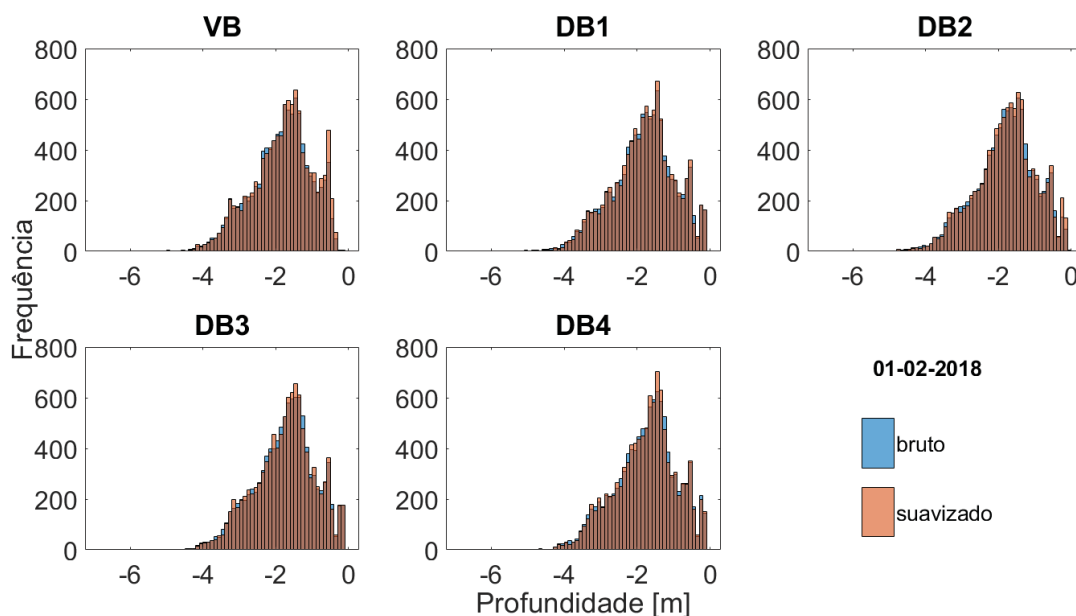


Figura 77 – Histograma dos dados brutos e suavizados para cada feixe referente ao levantamento realizado no primeiro dia de campanha.

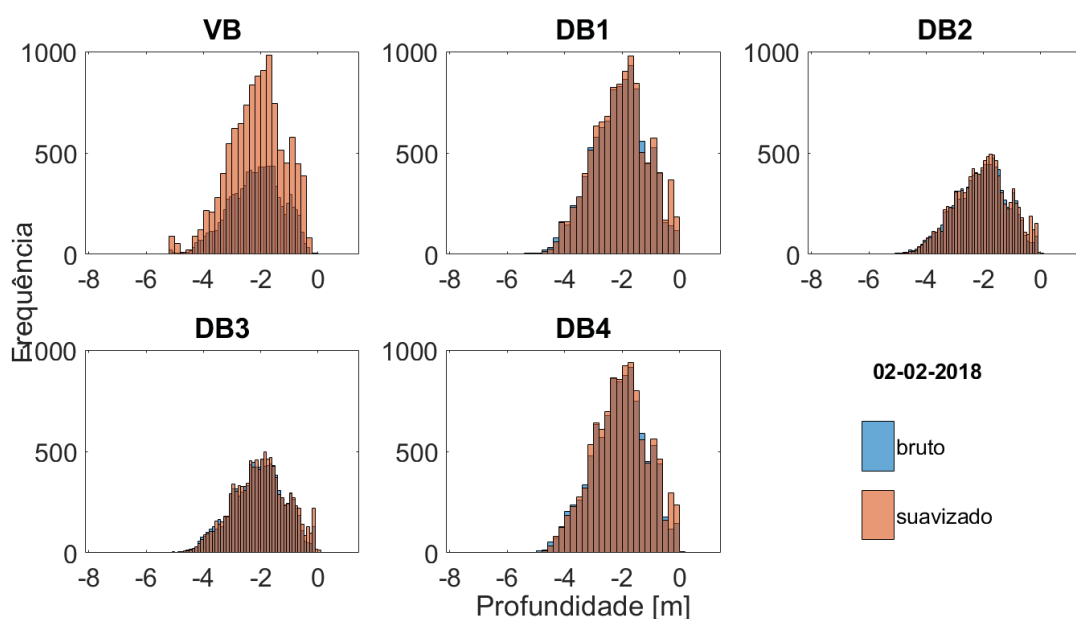


Figura 78 – Histograma dos dados brutos e suavizados para cada feixe referente ao levantamento realizado no segundo dia de campanha.

Em função da falta de informação de dados de um SBES na região do levantamento com o ADCP foi possível somente a aplicação do modelo obtido para o reservatório Passaúna. Deve estar claro que esta etapa só foi concretizada com intuito de comparar os resultados com um MDE gerado em no trabalho de Ratton (2020) com o mesmo conjunto de dados (Figura 79). O autor fez a análise da morfologia de fundo (altura, comprimento e velocidade de deslocamento das dunas). Na etapa de processamento a correção das altitudes foi realizada manualmente (eliminando dados espúrios visualmente), e aplicou a batimetria para reduzir as altitudes até o leito. Gerou os MDE's de altitudes com o auxílio do software Delft 3D com uma malha refinada (entre 0,8 m e 2,4 m) de acordo com a concentração de medições em cada região.

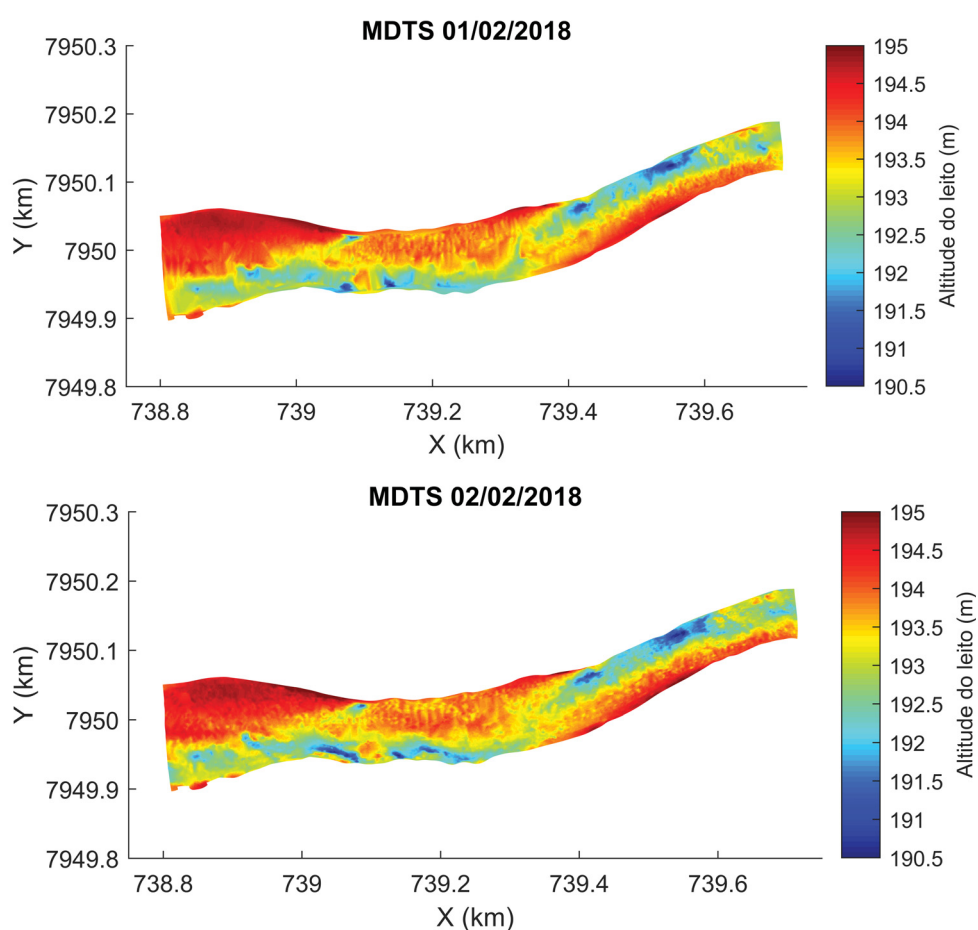


Figura 79 – MDE gerados a partir de dados coletados com o conjunto M9 da SonTek no rio Taquari-MS.

Fonte: Ratton (2020).

A partir do mesmo conjunto de dados foram gerados MDE's dos dados brutos (utilizando o software Surfer). Foram detectadas diferenças de até 1 metro (dados brutos) em relação aos MDE's de Ratton (2020), indicando a necessidade de um pós-processamento. Após a suavização os intervalos ficaram mais próximos aos valores comparados. No entanto, os resultados obtidos no reservatório Passaúna apresentaram discrepâncias de até 0,56



metros entre os dados suavizados e ajustados, mostrando a importância da etapa de ajustamento. Como não há dados de um SBES na mesma época do levantamento com o ADCP, os dados suavizados foram ajustados com as equações obtidas no reservatório Passaúna para os feixes vertical (VB) e Doppler (DB) (Figura 80). O intervalo de profundidades brutas sofreu uma redução de 6,4 m para 4,6 m com a suavização, e para 4,3 m com o ajustamento. Considerando que o modelo de regressão linear estivesse correto para este ambiente, a discrepância seria de até 0,30 metros.

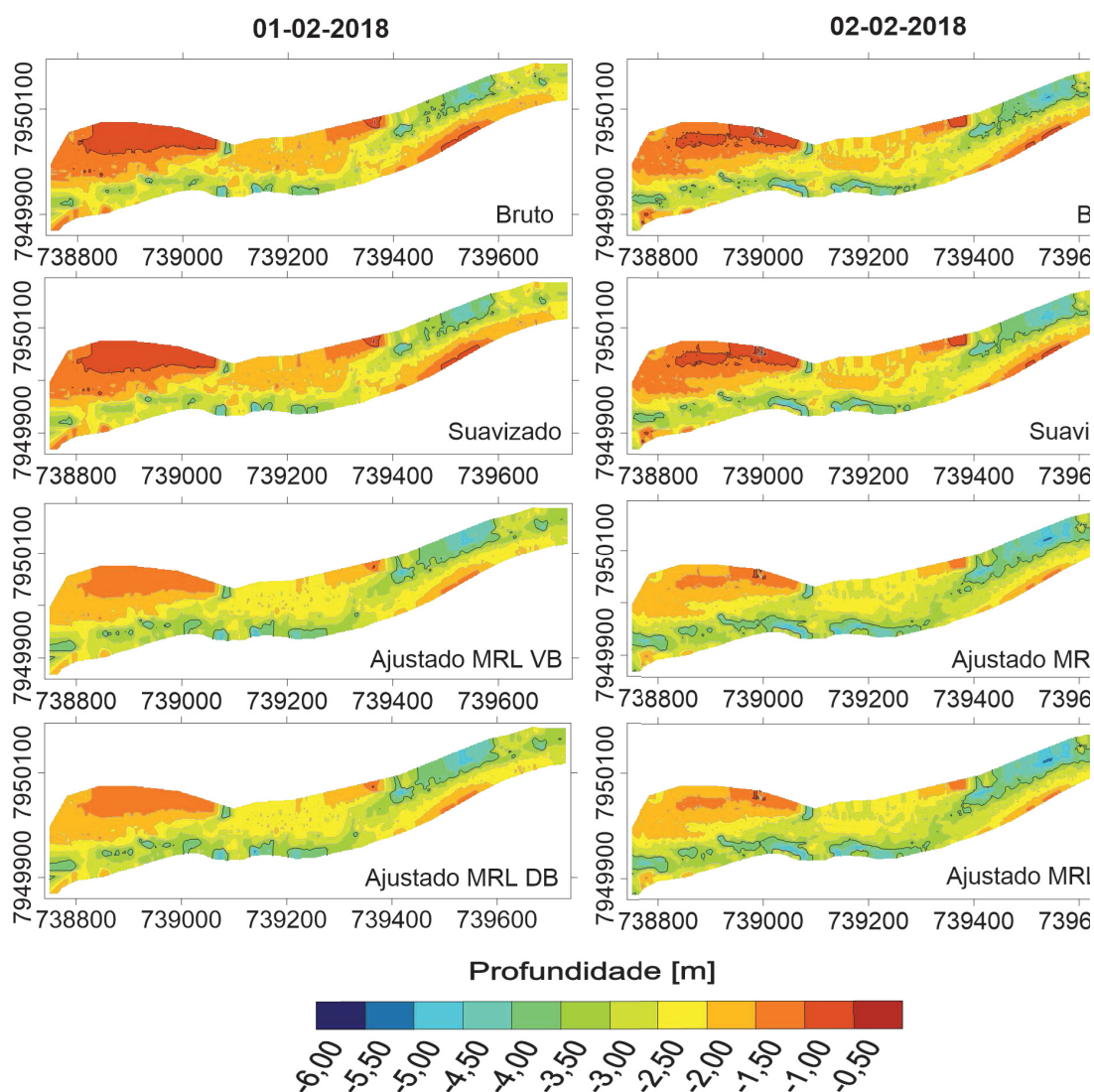


Figura 80 – MDE bruto suavizado e ajustado (VB e DB) pelos modelos de regressão linear criada com dados do reservatório Passaúna.

A medição com o sensor acústico pode acarretar incertezas na determinação da profundidade. Porém as incertezas do posicionamento planimétrico podem aumentar os erros do levantamento devido ao deslocamento espacial da profundidade. É importante verificar os parâmetros de qualidade do posicionamento para entender a natureza dos erros. São apresentados na figura 81 valores de HDOP menores de 6, métodos de posicionamento predominantemente RTK (pontos em verde) e algumas regiões a utilização do método DGPS



(pontos em azul). O número de satélites observados simultaneamente foram superiores a 5 em todo o levantamento. Apesar da precisão que o método DGPS fornece ser inferior ao RTK, os valores de HDOP foram menores que 2 e o número de satélites também se encontraram dentro dos requisitos para um bom levantamento (observação simultânea de no mínimo 5 satélites e DOP menor ou igual 6).

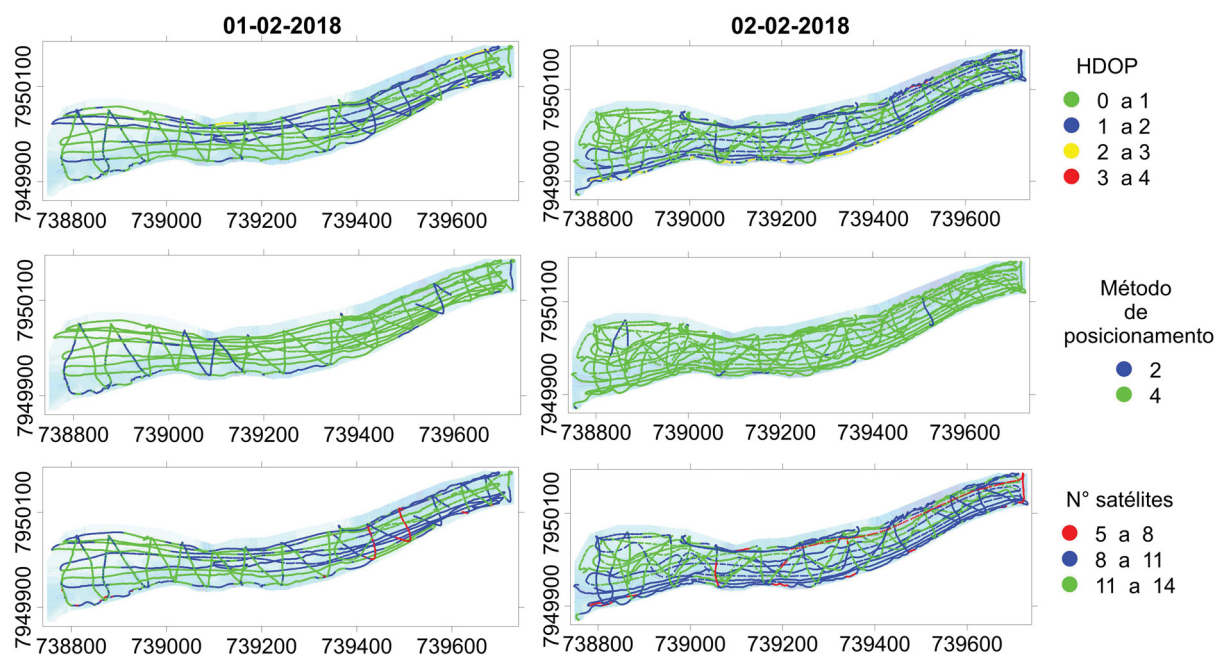


Figura 81 – Distribuição espacial dos parâmetros de qualidade do posicionamento usando o GPS Hemisphere para os dois dias de campanhas. Onde valor igual a 2 significa a utilização do método DGPS e 4 representa o uso do método RTK.

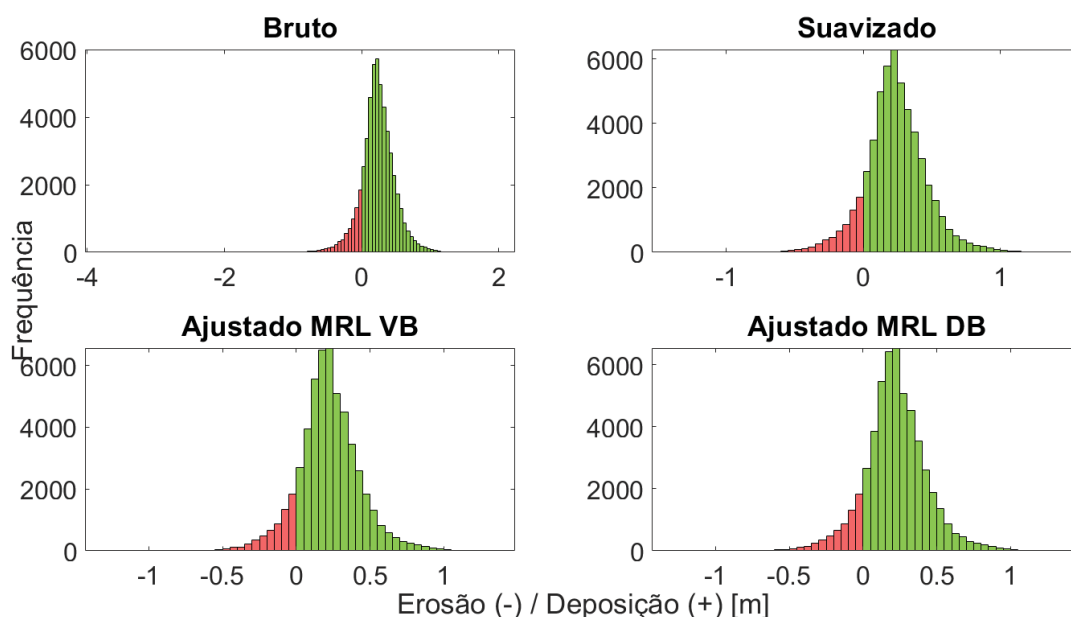


Figura 82 – Histogramas dos resíduos entre os dois MDE's do rio Taquari, onde os valores negativos representam a erosão (barras em vermelho) e os valores positivos a deposição de sedimento (barras em verde).

Foram detectadas diferenças de até 3,7 metros entre os modelos. Após o processamento dos dados seguindo as etapas de filtragem descritas na seção 5.2.1.3, o intervalo reduziu de 5,8 metros para 2,8 metros os dados suavizados, mais próximo do resultado obtido por Ratton (2020), onde o intervalo foi de 3 metros. O histograma dos dados brutos na figura 82 mostra a diferença entre os MDE's dos dois dias de levantamento, onde as barras em vermelho representam a erosão e em verde a deposição de sedimento, indicando menores profundidades no segundo dia de levantamento. Os dados brutos mostraram uma variação de até 4 metros. Apesar de baixa frequência, o conjunto de dados brutos mostra a presença de dados espúrios e a necessidade de pós-processamento.

A suavização dos dados reduziu o intervalo dos resíduos entre -3,7 e 1,95 metros para -1,4 a 1,4 metros, semelhantes ao intervalo, de -1,5 a 1,5 metros (Figura 83), apresentado por Ratton (2020). Os conjuntos ajustados, tanto pelo modelo VB quanto DB, reduziram as profundidades em até 1,46 m, ou seja, três vezes mais daquelas obtidas no reservatório Passaúna. Como não existem dados com SBES no mesmo período, a validação é inviável. Não é possível afirmar que os modelos de regressão de outra localidade sejam eficazes para o ajustamento de qualquer outro ambiente, mas é um processo necessário para melhoria da qualidade dos dados batimétricos conforme constatado na seção 5.2.2.

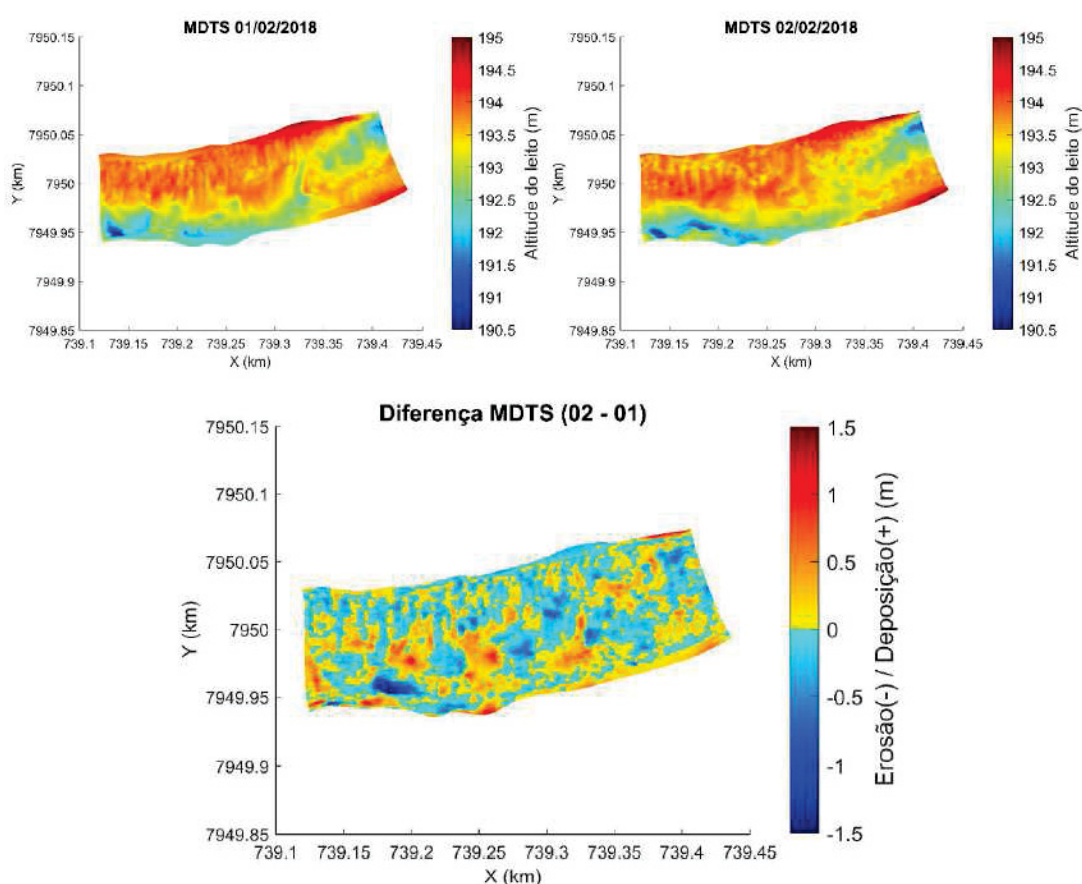


Figura 83 – MDE's das altitudes elipsoidais para os dois dias de levantamento e a diferença entre os modelos.

Fonte: Ratton (2020).

Devido a grande dinâmica do rio Taquari, acredita-se que as dunas sofrem movimentações rápidas (dentro de um período de 24h). A partir do MDE gerado com os dados brutos, foram selecionados 4 perfis longitudinais (Figura 84) aleatoriamente na tentativa de detectar as estruturas de fundo e seus respectivos deslocamento.

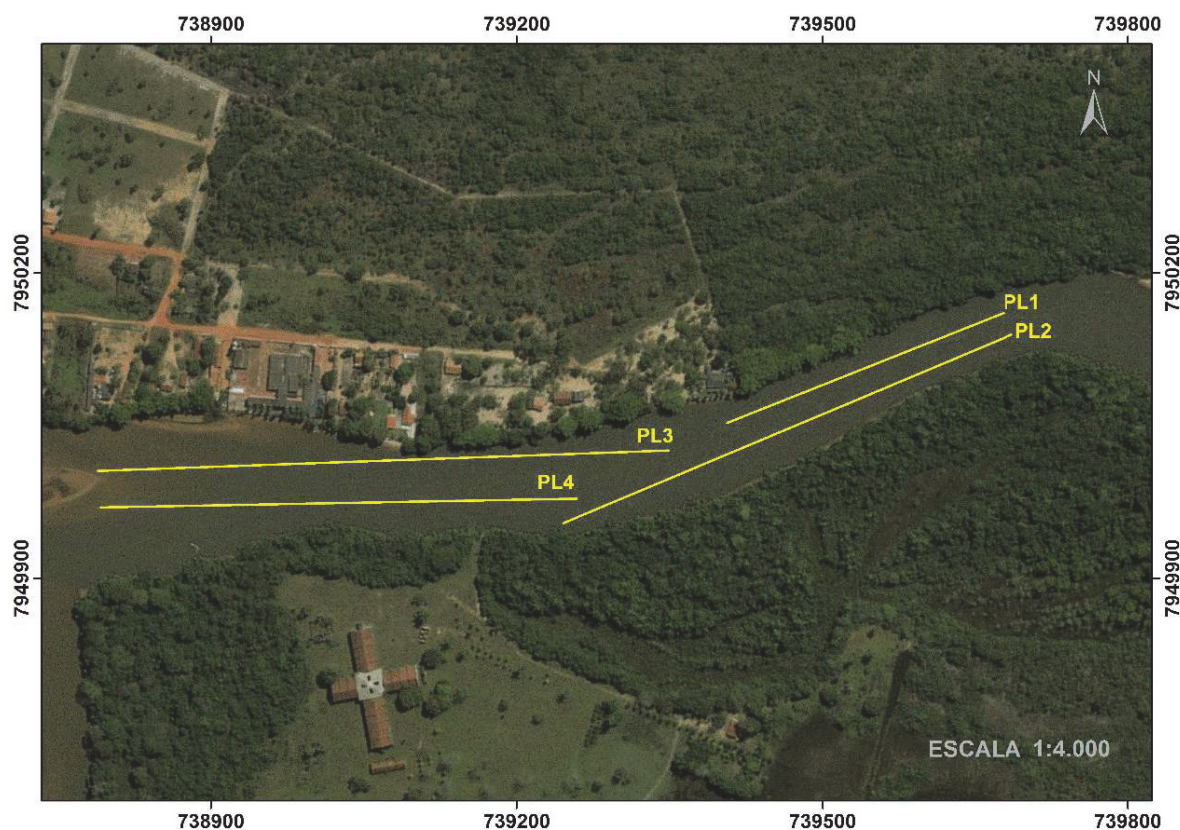


Figura 84 – Perfis longitudinais retirados para análise das estruturas de fundo.

Como pode ser observado na Figura 85, foi possível verificar variações do fundo com altura variando em até 1 metro aproximadamente e comprimento de onda de algumas dezenas de metros, corroborando com a escala de grandeza apresentados por Ratton (2020), onde foram encontrados comprimentos entre 15 m e 35 m, e alturas entre 0,25 m e 0,45 m. Com os perfis plotados foi possível identificar visualmente dunas que aparecessem em ambos os dias de coleta em que foram tiradas medidas como altura da estrutura e comprimento de onda, onde se calculou a diferença entre os respectivos dias, como indicado na Tabela (18). As maiores variações puderam ser observadas no PL2, amostra 2, com diferença de altura de 0,64 metros e comprimento de onda de 12,58 metros. As menores variações foram de 0,09 e 0,50 metros para PL3 (amostra 2).

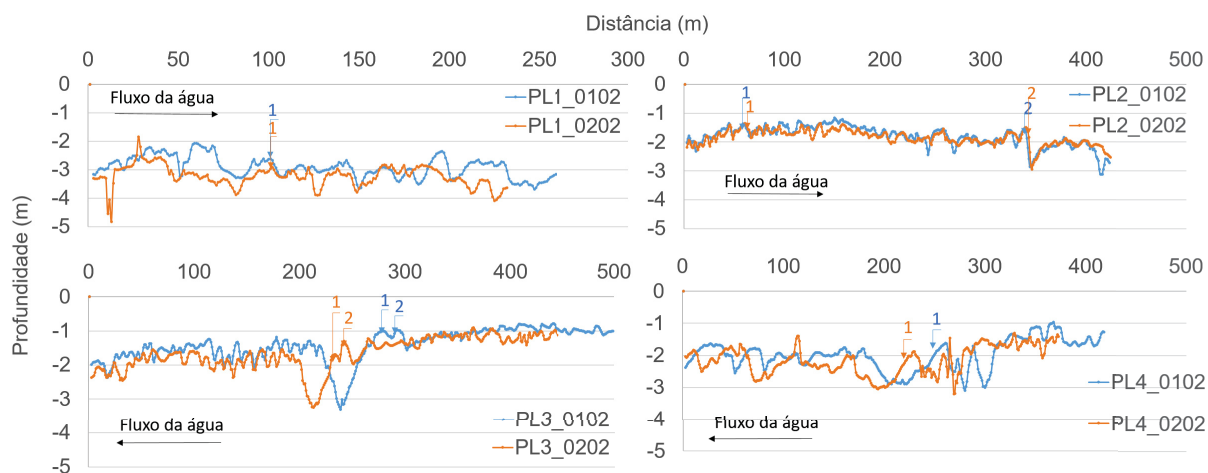


Figura 85 – Gráfico longitudinal dos perfis amostrais para os dias 01/02/18 e 02/02/18 em azul e vermelho, respectivamente. Onde o eixo x é a distância do perfil longitudinal e em Y as profundidades.

Tabela 18 – Altura, comprimento e variação das estruturas de fundo, em metros, para dois dias de campanha realizadas no rio Taquari.

Perfil	Amostra	H (m)	$\Delta H$ (m)	$\lambda$ (m)	$\Delta \lambda$ (m)
PL1_0102	1	0,65	0,31	10,52	-2,46
PL1_0202		0,35		12,55	
PL2_0102	1	0,46	-0,05	12,55	-1,01
PL2_0202		0,51		13,56	
PL2_0102	2	0,82	-0,64	27,19	12,58
PL2_0202		1,46		14,61	
PL3_0102	1	0,22	0,02	20,28	-4,94
PL3_0202		0,20		25,22	
PL3_0102	2	0,59	-0,09	16,90	0,50
PL3_0202		0,68		16,39	
PL4_0102	1	0,89	0,11	40,41	5,17
PL4_0202		0,78		35,24	

Uma das vantagens do ADCP são as medições simultâneas de profundidade e velocidade da água ao longa de sua profundidade. Utilizando os dados de velocidade foram calculadas as velocidades médias de acordo com o modelo observado na Figura 86, onde as maiores velocidades se encontram em regiões de maiores profundidades. Considerando que as etapas de pós-processamento desenvolvidas nesta pesquisa fossem validadas, somente os dados brutos proporcionariam erros maiores que 1 m.





Figura 86 – Modelos de profundidades com perfis longitudinais selecionados para análise de estruturas de fundo e modelos das velocidades médias para dois dias de campanha no rio Taquari.

Além dos valores médios de velocidades, o ADCP proporciona as velocidades ao longo da coluna d'água e a direção do fluxo. A Figura 87 mostra as maiores velocidades nas cristas das dunas e velocidades mais baixas nas depressões. Essa "fotografia" não seria vista desta forma se os dados não fossem coletados simultaneamente, ou seja, poderia haver um deslocamento dos perfis de velocidade em relação a batimetria uma vez que as variações obtidas na área de estudo foram diárias. O ADCP permite uma análise mais acurada de ambientes altamente dinâmicos, como o rio Taquari, em que as estruturas de fundo sofrem mudanças diárias.

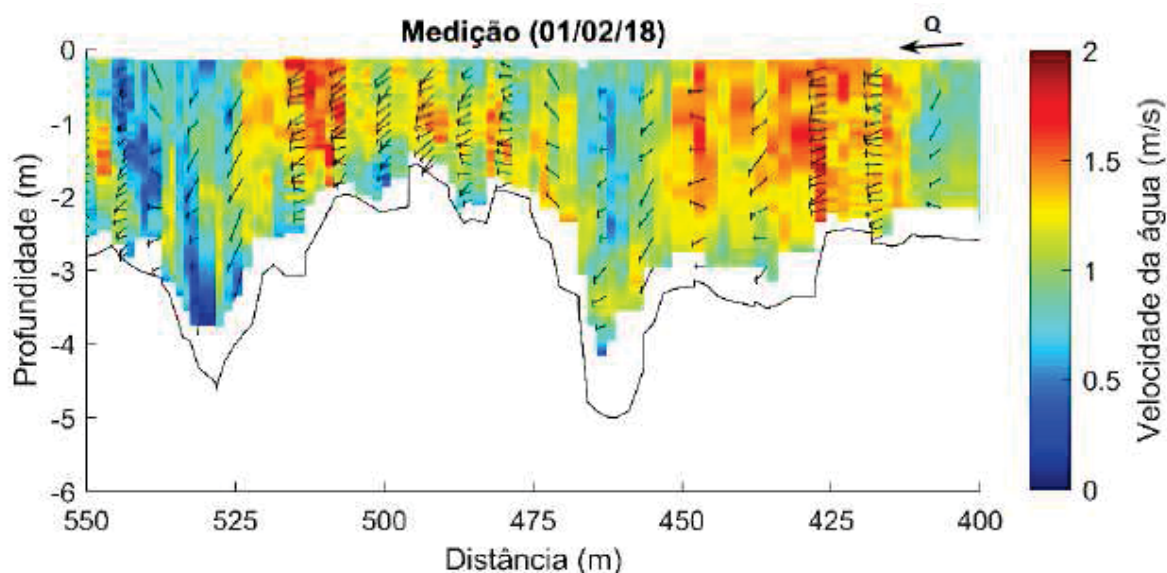


Figura 87 – Perfil de velocidades em uma seção longitudinal no rio Taquari.  
Fonte: Ratton (2020).

Ratton (2020), utilizou as profundidades e velocidades obtidas com o ADCP para a detecção de estruturas do fundo e o cálculo da descarga sólida do leito no rio Taquari. Essa aplicação mostra a importância de uma batimetria de qualidade para que não ocorra

uma subestimação ou superestimação dos resultados, bem como a obtenção simultânea às velocidades para uma análise espaço-temporal mais acurada do sistema.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa verificar consistiu na sistematização das etapas de pós-processamento dos dados de profundidade do ADCP, de forma a atender as especificações técnicas descritas pela IHO (2020) e ANA (2013).

Os principais resultados deste estudo foram:

- Análise da precisão e acurácia do GPS e ADCP do conjunto M9
- Sistematização do pós-processamento dos dados de profundidade do ADCP por meio de uma rotina desenvolvida em matlab
- Avaliação das etapas de pós-processamento aplicadas em ambientes naturais
- Melhoria na qualidade da batimetria obtida por meio do ADCP em 83%, observada no reservatório Passaúna
- Ganho na quantidade de medições em um mesmo instante de tempo em 400% em relação ao SBES, constatando a viabilidade do uso dos feixes inclinados para medição de profundidade
- Aproveitamento de recursos/tempo de coleta dos dados de profundidade com o ADCP (obtenção de dados sincronizados de batimetria e hidrometria)

### **Posicionamento planimétrico da embarcação:**

No que concerne o posicionamento planimétrico, o GPS Hemisphere A21 operando em modo RTK e livre de obstruções, atingiu precisões na ordem de 0,05 centímetros para planimetria e 0,12 para plani-altimetria nos testes estáticos, atingindo as precisões planimétricas exigidas pelas especificações técnicas descritas por IHO (2020) e ANA (2013).

Nos testes cinemáticos sua acurácia apresentou variações quanto ao nível de obstrução presente na região do levantamento. Para regiões totalmente obstruídas a acurácia obtida variou entre 0,24 e 19 metros, obstruídas entre 0,24 e 2,8 metros e não obstruídas entre 0,05 e 1,34 metros. A geometria e baixa elevação dos satélites, adicionados com a densa vegetação no entorno dos vértices acabaram degradando a precisão dos pontos classificados como não obstruídos. Nesse contexto, é importante o planejamento para identificar regiões que possam ocasionar erros no levantamento, e dessa forma evitar essas regiões ou tentar minimizar possíveis interferências.

Os resultados dos testes, estático e cinemático, proporcionaram erros dentro daqueles exigido em posicionamento usando o método RTK. Indicando que o GPS Hemisphere A21, adquirido no conjunto do ADP M9, pode ser usado para a determinação do posicionamento



planimétrico de um levantamento batimétrico com as precisão requisitadas pelas normas vigentes desde que tomadas as devidas precauções, principalmente na questão de obstrução no entorno da área a ser levantada.

A linha de base dos testes para a aplicação no reservatório Passaúna passou de 150 metros para 500 metros, apresentando mais de 95% dos dados operando em RTK com boa qualidade (número de satélites observados e HDOP menor que 6). Algumas observações não atenderam os requisitos mínimos devido a configuração da constelação GPS e não por limitação do receptor GPS. Portanto, o conjunto GPS Hemisphere A21 se mostrou apto para obtenção de coordenadas planimétricas para linhas de base curta, em razão da comunicação entre a estação de referência e rover ser a partir de conexão bluetooth.

### **Batimetria usando o ADCP:**

Em relação a determinação das profundidades, o teste estático com perfilador acústico ET4 em que o SBES operou simultaneamente com o ADCP, mostrou que os feixes Doppler sofrem interferências dos sinais emitidos por outros sensores acústicos, mesmo com diferentes frequências, sendo aconselhável seu uso individual. Caso contrário, maiores investigações são necessárias no que concerne a operação simultânea dos sensores.

Na aplicação para ambiente natural, neste caso, a região do *buffer* no reservatório Passaúna, o comportamento dos histogramas dos feixes Doppler foram similares, indicativo que os dados estão mais consistentes em relação aos testes realizados em ambiente controle. Os ruídos da área de controle foram provocados pela superfície extremamente reflexiva, em que os sinais sofreram reflexões secundárias antes de retornar ao ADCP, causando o registro de profundidades até quatro vezes maiores que a profundidade real.

Apesar de sofrer menos ruído, as profundidades da região do *buffer* foram subestimadas quando comparadas com as medições com SBES, sendo necessário o pós-processamento dos dados. A tentativa de verificar se o mesmo modelo gerado na área de controle poderia ser utilizado para diversos ambientes, mostrou que devido as diferentes características dos dois ambientes, a aplicação do modelo se torna ineficiente. Para comprovação, a qualidade dos resultados foi realizada por meio da comparação dos resultados do ADCP com os erros permitidos pela ANA e IHO, utilizando os dados do SBES como referência, os quais apresentaram discrepâncias maiores daquelas calculadas seguindo as normas.

Ciente da ineficiência da aplicação dos modelos obtidos na área de controle para o ajustamento dos dados do reservatório, foram gerados modelos usando os dados coletados com SBES *in situ*. Os resultados foram satisfatórios, em que mais de 80% das medições se encontraram dentro dos erros permitidos pelas especificações técnicas. Acredita-se que alguns pontos apresentaram erro maior que 1 metro devido a divergência de métodos aplicados na determinação do posicionamento planimétrico dos sensores (ADCP e SBES). Onde

a imprecisão do método absoluto usado com SBES provavelmente causou o deslocamento espacial das profundidades.

Os modelos de regressão linear obtidos no reservatório Passaúna não puderam ser validados para o rio Taquari devido a falta de medições de referência com um SBES. Os altos valores (maiores que 3 m) de erosão obtidos com os dados brutos, indicam a necessidade de um pós-processamento. As diferentes características do rio Taquari, juntamente com as grandes variações de profundidade após o ajustamento indicam que as equações não foram adequadas. Portanto, sugere-se que os modelos sejam obtidos com uma amostra da região de interesse para evitar subestimação ou superestimações dos dados.

Os resultados do rio Taquari evidenciam o potencial do sensor acústico de efeito Doppler na detecção de dunas no fundo submerso. Sendo recomendado efetuar uma verificação na consistência dos dados antes da análise destas estruturas. Após a comprovação de uma filtragem dos dados bem sucedida, novas análises quanto ao comportamento e dimensionamento dessas estruturas poderão ser realizadas.

As diferenças observadas nos modelos de regressão linear obtidos para os feixes vertical e Doppler do ADCP, mostram a necessidade de um processamento individual de cada tipo de feixe, devido as peculiaridades de cada um (como o ângulo de abertura do feixe, ângulo de incidência e princípios de funcionamento). Ambos sensores, ADCP e SBES, proporcionam uma medição a cada segundo. Portanto, o ADCP possui a vantagem de realizar além do feixe vertical, 4 medições adicionais em relação ao SBES.

### **Recomendações para trabalhos futuros**

Os resultados com o GPS do conjunto M9 em laboratório proporcionou acurácia compatível com as especificações técnicas. Porém, quando analisados os resíduos dos MDE's em ambiente natural, foram detectados diferenças significativas em relação aos dados do SBES. Acredita-se que essas discrepâncias podem estar associadas a divergência dos métodos de posicionamento aplicados, causando o deslocamento espacial da posição da profundidade. Em que as coordenadas do ADCP foram determinadas a partir do método RTK e as coordenadas do SBES pelo método absoluto, com imprecisão métrica. Para tornar o ajustamento dos dados mais preciso, recomenda-se o uso de um mesmo método de posicionamento na obtenção das coordenadas planimétricas.

O pós-processamento proposto nesta pesquisa se mostrou viável e recomendável para a determinação da profundidade obtida com o ADCP. Estudos quanto a comparação dos resultados em diferentes locais poderiam ser realizados para verificar se os modelos, dos feixes vertical e Doppler, atuariam de forma eficaz para regiões com características similares (como por exemplo, profundidade, tipo de sedimento e salinidade). Nesse contexto, a comparação de diferentes modelos de ADCP's poderiam ser elaborados com o intuito de

obter um modelo geral para cada feixe (vertical e Doppler), tornando ainda mais prático e rentável o ajustamento dos dados.

## REFERÊNCIAS

ALVES, S. d. C. *Investigação da variação volumétrica de reservatório de abastecimento de água mediante o emprego de diferentes espaçamentos entre as linhas regulares de sondagem*. Curitiba: [s.n.], 2019. 104 p. Citado na página 50.

ANA. *Orientações para atualização das curvas cota x área x volume*. Brasília, 2013. 40 p. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas\\_Cota\\_Area\\_Volume\\_Versao\\_Dez2013.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas_Cota_Area_Volume_Versao_Dez2013.pdf)>. Citado 11 vezes nas páginas 24, 25, 27, 30, 31, 52, 55, 64, 69, 75 e 131.

BAE, I.; JI, U. Outlier detection and smoothing process for water level data measured by ultrasonic sensor in stream flows. *Water (Switzerland)*, v. 11, n. 5, 2019. ISSN 20734441. Citado na página 66.

BINH, D. V.; KANTOUSH, S.; SUMI, T. Changes to long-term discharge and sediment loads in the Vietnamese Mekong Delta caused by upstream dams. *Geomorphology*, Elsevier B.V., v. 353, p. 1–14, 2019. ISSN 0169555X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.107011>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 43 e 45.

BRUK, S. *Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs*. [S.l.: s.n.], 1985. 224 p. Citado na página 27.

BUZZI-FERRARIS, G.; MANENTI, F. Outlier detection in large data sets. *Comput. Chem. Eng.*, Elsevier Ltd, v. 35, n. 2, p. 388–390, 2011. ISSN 00981354. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.11.004>>. Citado na página 66.

BYRNES, M. R.; BAKER, J. L.; LI, F. *Quantifying Potential Measurement Errors and Uncertainties Associated with Bathymetric Change Analysis*. [S.l.], 2002. 1–17 p. Citado na página 28.

CARVALHO, L. D. *Análise das técnicas GPS atuais para os posicionamentos estáticos e cinemáticos em bases curtas*. 139 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal do Paraná, 1999. Citado na página 36.

CARVALHO, N. d. O. et al. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. [S.l.], 2000. 140 p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros-GuiaAsso.pdf>>. Citado na página 31.

CURRAN, C. A. et al. *Bank topography, bathymetry, and current velocity of the Lower Elwha River, Clallam County, Washington, May 2006*. Reston, 2008. 12 p. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/ds/363/>>. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 45.

DALMOLIN, Q. *Ajustamento por mínimos quadrados*. Curitiba: Quintino Dalmolin, 2010. 180 p. ISBN 85-88783-02-9. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 66.

De SOUZA, A. V. *Transdutores*. Niterói: [s.n.], 2007. 33 p. Citado na página 32.

- De Souza, A. V. *Análise dos parâmetros que compõem a equação da incerteza vertical propagada da profundidade reduzida*. 169 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal do Paraná, 2011. Citado na página 28.
- EAKIN, H. M. *Silting of reservoirs*. Washington, D.C., 1939. v. 524, 168 p. Citado na página 27.
- Empresa de Pesquisa Energética, E. *Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019*. Rio de Janeiro, 2020. 292 p. Citado na página 24.
- Federal Geographical Data Committee. Part 3 : National Standard for Spatial Data Accuracy. In: *Geospatial Position. Accuracy Stand.* Virginia: [s.n.], 1998. p. 28. ISBN FGDC-STD-007.3-1998. Disponível em: <<http://www.fgdc.gov/standards-projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>>. Citado na página 59.
- FERREIRA, Í. O. *Coleta, Processamento E Análise De Dados Batimétricos Visando a Representação Computacional Do Relevo Submerso Utilizando Interpoladores Determinísticos e Probabilísticos*. 70 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal de Viçosa, 2013. Citado na página 27.
- FOSNESS, R.; DIETSCH, B. *Topographic and hydrographic survey data for the São Francisco River near Torrinha, Bahia, Brazil, 2014*. Reston, 2015. 28 p. Disponível em: <<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds965>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 42 e 45.
- FRANKE, R. Scattered data interpolation: tests of some methods. *Math. Comput.*, v. 38, n. 157, p. 181–181, jan 1982. ISSN 0025-5718. Disponível em: <<http://www.ams.org/jourcgi/jour-getitem?pii=S0025-5718-1982-0637296-4>>. Citado na página 39.
- FUKUDA, S.; HIRAMATSU, K.; HARADA, M. Assessment of depth measurement using an acoustic doppler current profiler and a CTD profiler in a small river in Japan. In: KIGUCHI, K. et al. (Ed.). *Intell. Robot. Appl. - 9th Int. Conf. ICIRA 2016, Proc.* Tokyo: International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2016. p. 308–316. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-40852-6> [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-43518-3\\_30](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-43518-3_30)>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 45.
- FURNANS, J.; AUSTIN, B. Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. *Environ. Model. Softw.*, v. 23, n. 2, p. 139–146, 2008. ISSN 13648152. Citado na página 66.
- GAGG, G. *Apostila de Levantamentos Hidrográficos - Noções Gerais*. Porto Alegre: [s.n.], 2016. 41 p. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 32.
- GALDINO, S.; VIEIRA, L. M.; PELLEGRIN, L. A. *Impactos Ambientais E Socioeconomicos Na Bacia Do Rio Taquari-Pantanal*. Corumbá: [s.n.], 2006. 356 p. ISBN 859889302-1. Citado na página 71.
- GONZAGA, J. P. *Classificação Automática de Padrões Sonográficos: Estudo de caso do Rio Araguaia*. 83 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal Fluminense, 2017. Citado na página 25.

- GONZÁLEZ-CASTRO, J. A.; MUSTE, M. Framework for estimating uncertainty of ADCP measurements from a moving boat by standardized uncertainty analysis. *J. Hydraul. Eng.*, v. 133, n. 12, p. 1390–1410, 2007. ISSN 07339429. Citado na página 97.
- HEETO, A. F.; ALI, S. M.; YOUSIF, A. A. Creating a bathymetric contour map using acoustic Doppler current profiler (ADCP): Duhok Dam reservoir as a case study. *Polytech. J.*, v. 7, n. 4, p. 40–55, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 26, 42, 44 e 45.
- HEGARTY, C. J. *Understanding GPS / GNSS*. [S.l.: s.n.], 2017. ISBN 9781630810580. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 75.
- Hemisphere GNSS. *Hemisphere GNSS Technical Reference Manual*. [S.l.: s.n.], 2018. 586 p. Citado na página 48.
- HILGERT, S.; SOTIRI, K.; FUCHS, S. Advanced assessment of sediment characteristics based on rheological and hydro-acoustic measurements in a Brazilian reservoir. In: *38th IAHR World Congr. - Connect. world*. Panama: IAHR World Congress, 2019. p. 10. Disponível em: <[https://www.iahr.org/paper/detail?paper\\_id=2801](https://www.iahr.org/paper/detail?paper_id=2801)>. Citado na página 68.
- HILGERT, S. et al. Resolving spatial heterogeneities of methane ebullition flux from a Brazilian reservoir by combining hydro-acoustic measurements with methane production potential. In: *38th IAHR World Congr. - Connect. world*. Panama: World Congress Water, 2019. p. 10. Disponível em: <[https://www.iahr.org/paper/detail?paper\\_id=3211](https://www.iahr.org/paper/detail?paper_id=3211)>. Citado na página 68.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS — Global Navigation Satellite Systems*. Vienna: Springer Vienna, 2008. 518 p. ISBN 978-3-211-73012-6. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-211-73017-1>>. Citado na página 58.
- HOLLANDER, M.; WOLFE, D. A.; CHICKEN, E. *Nonparametric Statistical Methods*. 3. ed. New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2014. ISBN 9780470387375. Citado na página 41.
- HUINCA, S. C. M. *Análise de influências ambientais na calibração de antenas de receptores GPS*. 215 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2014. Citado na página 34.
- IBGE. *Recomendações para Levantamentos Relativo Estático - GPS*. 2008. 20 p. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/outros-documentos-tecnicos-geo/16376-recomendacoes-para-levantamentos-relativos-esticos-gps.html?=&t=downloads>>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 37 e 38.
- IHO. *Hydrographic dictionary*. 1994. 280 p. Citado na página 28.
- IHO. Chapter 2 - Positioning. In: *Man. Hydrogr.* 1. ed. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2005. cap. 2, p. 33–118. Citado na página 25.
- IHO. Chapter 3 - Depth Determination. In: *Man. Hydrogr.* 1. ed. Monaco: International Hydrographic Organization, 2005. cap. 3, p. 119–198. Citado 4 vezes nas páginas 25, 28, 29 e 32.



IHO. *Standards for Hydrographic Surveys (S-44)*. 5. ed. Monaco: International Hydrographic Bureau MONACO, 2008. 36 p. Disponível em: <[https://iho.int/uploads-user/pubs/standards/s-44/S-44\\_5E.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_5E.pdf)>. Citado na página 75.

IHO. *International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys*. 6.0.0. ed. Monaco: International Hydrographic Organization, 2020. 1–49 p. Disponível em: <[https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44\\_Edition\\_6.0.0\\_EN.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf)>. Citado 9 vezes nas páginas 29, 30, 31, 52, 55, 64, 69, 96 e 131.

INCRA. *Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais*. [S.l.], 2010. Citado na página 75.

INCRA. *Manual Técnico de Posicionamento georreferenciamento de imóveis rurais*. 1. ed. Brasília: [s.n.], 2013. 34 p. Disponível em: <[http://www.incra.gov.br/sites/default-files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/manual\\_tecnico\\_de\\_posicionamento\\_1\\_edicao.pdf](http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/manual_tecnico_de_posicionamento_1_edicao.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 38, 75 e 77.

KASVI, E. et al. Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers. *Geomorphology*, The Authors, v. 333, p. 180–197, 2019. ISSN 0169555X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.017>>. Citado 5 vezes nas páginas 26, 44, 45, 97 e 117.

KEARNS, T. A.; BREMAN, J. Bathymetry - the art and science of seafloor modeling for moder applications. In: *Ocean Globe*. [S.l.]: ESRI Press, 2010. p. 1–36. ISBN 978-1-58948-219-7- 274. Citado na página 32.

KRUEGER, C. P. *Investigação sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 31, 36 e 38.

LEYS, C. et al. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J. Exp. Soc. Psychol.*, Elsevier Inc., v. 49, n. 4, p. 764–766, jul 2013. ISSN 00221031. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022103113000668>>. Citado na página 66.

MARCON, L. *High temporal resolution measurement of ebullition in a subtropical reservoir*. 89 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2018. Citado na página 68.

MARCON, L. et al. High-frequency measurements of gas ebullition in a Brazilian subtropical reservoir—identification of relevant triggers and seasonal patterns. *Environ. Monit. Assess.*, v. 191, n. 6, p. 18, jun 2019. ISSN 0167-6369. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10661-019-7498-9>>. Citado na página 68.

Marinha do Brasil. *NORMAM-25*. Rio de Janeiro: Diretoria Hidrografia e Navegação (DHN) - Marinha do Brasil, 2017. 94 p. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

MARTINS, R.; SOUSA, L. de. *Sistema de Informação Geográfica para aplicações de Robótica Oceanográfica*. 119 p. Tese (Doutorado) — Instituto Superior Técnico, 2002. Citado na página 39.

- MATOS, A. J. S. *Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”*. 125 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado na página 27.
- Mattar Neto, J.; KRÜGER, C. M.; DZIEDZIC, M. Análise de indicadores ambientais no reservatório do Passaúna. *Eng. Sanit. e Ambient.*, v. 14, n. 2, p. 205–213, jun 2009. ISSN 1413-4152. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522009000200008&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522009000200008&lng=pt&tlng=pt)>. Citado na página 68.
- MELO, A. C. D. E. et al. Integração De Dados Geofísicos E Geológicos Em Projetos De Dutos Rígidos Submersos : Análise Dos Métodos De Inferência Espacial. p. 1–6, 2010. Citado na página 32.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2008. 480 p. Citado 4 vezes nas páginas 34, 36, 37 e 38.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. 6. ed. [S.l.]: Wiley, 2013. 836 p. ISBN 9781118539712. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 66.
- MORLOCK, S. E. *Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge*. Indianapolis, 1996. 37 p. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/wri/wri95-4218/pdf/wri95-4218.pdf>>. Citado na página 98.
- OSBORNE, J. W.; OVERBAY, A. The power of outliers (and why researchers should ALWAYS check for them). *Pract. Assessment, Res. Eval.*, v. 9, n. 6, p. 1–8, 2004. ISSN 15317714. Citado na página 97.
- PINHEIRO, J. A. C. et al. *Relatório técnico: Levantamento batimétrico do rio Madeira II*. Porto Velho, 2016. 24 p. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17797>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 45.
- RATTON, P. *Mapeamento e modelagem 3D do transporte de sedimentos do leito em rios com dunas*. 185 p. Tese (Doutorado), 2020. Citado 9 vezes nas páginas 26, 43, 45, 71, 72, 123, 126, 127 e 129.
- SAMBUELLI, L.; BAVA, S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *J. Appl. Geophys.*, v. 81, p. 48–56, 2012. ISSN 09269851. Citado na página 66.
- SCIORTINO, J. A. Hydrographic surveys. In: *Fish. Harb. Plan. Constr. Manag.* Roma: [s.n.], 2010. cap. 5, p. 49–64. ISBN 978-92-5-106696-6. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/013/i1883e/i1883e00.htm>>. Citado na página 28.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy*. [S.l.: s.n.], 2003. ISBN 3110175495. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 38 e 58.
- SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality ( Complete Samples ). *Biometrika*, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965. Citado na página 41.
- SILVA, J. G. S. da. A Utilização Do Sonar De Varredura Lateral E Do Ecobatímetro Multifeixe Na Interpretação E Análise Da Morfologia Da Baía De Vitória (Es). p. 76, 2010. Citado na página 32.

- SONTEK. *Acoustic Doppler Profiler ( ADP ) Principles of Operation*. 2000. 1–28 p. Citado na página 33.
- SONTEK. *RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 3.00*. San Diego: [s.n.], 2013. 154 p. Citado na página 34.
- SONTEK. *HydroSurveyor User's Manual*. In: . San Diego: [s.n.], 2014. v. 1, n. October, p. 1–149. Citado na página 49.
- SONTEK. *RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 4.02*. San Diego: SonTek, a Xylem brand, 2016. 154 p. Citado na página 48.
- TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. *Rev. do Hosp. Clínicas Porto Alegre*, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012. ISSN 2357-9730. Citado na página 40.
- Trimble Inc. *GNSS Planning Online*. 2018. Disponível em: <<https://www.gnssplanning.com/#/settings>>. Citado na página 79.
- TRUMP, C. L.; MARMORINO, G. O. Use of Single-Ping Bottom-Track ADCP Data to Characterize Small-Scale Bathymetry. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, v. 15, n. 1, p. 299–303, feb 1998. ISSN 0739-0572. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0426%281998%29015%3C0299%3AUOSPBT%3E2.0.CO%3B2>> <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426%281998%29015%3C0299%3AUOSPBT%3E2.0.CO%3B2>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 43 e 45.
- TÚLIO, S.; GAMARO, P.E.M. MALDONADO, L. Avaliação do uso do medidor de vazão Doppler com feixe vertical em levantamentos batimétricos. *XIX Simpósio Bras. Recur. Hídricos*, 2011. Citado na página 25.
- WEI, E. C.; MCGUINNESS, J. L. *Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation*. [S.l.], 1973. 30 p. Citado na página 39.
- WILLGALIS, S. et al. A real time GPS reference network for cadastral surveys in Recife, Brazil. *Rev. Bras. Cartogr.*, v. 55/01, n. July 2003, p. 1–10, 2003. Disponível em: <<http://www.rbc.lsie.unb.br/index.php/rbc/article/view/176>>. Citado na página 35.
- WILSON, J. T.; MORLOCK, S. E.; BAKER, N. T. *Bathymetric surveys of morse and geist reservoirs in central Indiana made with acoustic doppler current profiler and global positioning system technology, 1996*. Indianapolis, 1997. 54 p. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/wri/1997/4099/report.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 42, 44 e 45.